

*М. Ю. Подлесных, А. С. Боровский*

## **ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДСТВ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ**

### **Аннотация.**

*Актуальность и цели.* Объектом исследования являются распределительные электрические сети объектов индивидуального жилья. Предметом исследования являются процессы контроля, анализа и управления распределением (потреблением) электрической энергии в секторе индивидуального жилья. Цель работы – на основе разработки модели функционирования системы контроля распределения электрической энергии как процесса взаимодействия множеств предложить состав комплекса средств учета электроэнергии.

*Материалы и методы.* Исследование вопросов распределения средств учета электроэнергии в электросетях как комплекса определенных средств учета выполнено на основе теории множеств, метода анализа иерархий и экспертных знаниях о предметной области.

*Результаты.* Разработана базовая модель системы контроля распределения электрической энергии на основе теории множеств. На основе базовой модели разработаны модели системы контроля распределения электрической энергии с использованием теории нечетких множеств и нечетких соответствий. Приведены конкретные примеры использования данных моделей.

*Выводы.* Описание функционирования системы контроля распределения электрической энергии в виде взаимодействия множеств позволяет предложить состав комплекса по учету и контролю за электроэнергией, основываясь на экспертных знаниях. Создание модели возможно с различными вариантами применения теории множеств. Полученные в моделях коэффициенты соответствия множества средств учета и контроля электроэнергии и множества элементов электрической сети показывают уровень необходимости наличия того или иного средства учета в каждой зоне сети, в совокупности определяя желаемый состав системы контроля распределения электроэнергии.

**Ключевые слова:** множество, нечеткое множество, соответствие множеств, нечеткое соответствие, композиция соответствий, метод анализа иерархий Саати.

*М. Yu. Podlesnykh, A. S. Borovskiy*

## **INTEGRATED APPROACH TO DEVELOPMENT OF THE DISTRIBUTION MODEL OF ACCOUNTING ELECTRICITY MEANS BASED ON THE SET THEORY**

### **Abstract.**

*Background.* Object of research are the electrical distribution network of objects of individual housing. The subject of research are the processes of monitoring, analysis and control of distribution (consumption) of electric energy in sector of private housing. The research goal is based on developing a model of functioning of the monitoring system of distribution of electric energy, as a process of interaction sets to offer a complex account of power.

*Materials and methods.* The study of the allocation of electricity metering in power grids as complex specific accounting is made on the basis of set theory, the analytic hierarchy process and expert knowledge of the subject area.

*Results.* Developed a basic model of a control system of distribution of electric energy on the basis of set theory. On the basis of the model – developed model of control system electrical power distribution using the theory of fuzzy sets and fuzzy matches. Specific examples of use of these models.

*Insights.* Description of the functioning of the monitoring system of distribution of electric energy in the form of interaction sets allows us to propose a complex structure for accounting and control of electricity, based on expert knowledge. The creation of the model is possible with different variants of application of the theory of sets. Obtained in the models the coefficients of the matching plurality of means of accounting and control of electricity and many electric grid elements to show the level of need of the presence of a records in each zone of the network, together defining the desired composition of the control system distribution.

**Key words:** set, fuzzy set, correspondence of sets, fuzzy correspondence, composition of correspondences, method of Saati hierarchies analysis

### **Введение**

В современном мире электроэнергетика является одной из важнейших отраслей российской экономики, развитию которой уделяется большое внимание как со стороны правительства РФ, так и со стороны деятелей науки и техники.

Таким образом, на основании Указа Президента Российской Федерации № 899 в 2011 г. были утверждены «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации», в соответствии с данным указом одними из критических технологий РФ признаны «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии» [1].

Одними из ключевых участников энергетического рынка Российской Федерации являются электросетевые компании, которые осуществляют транспорт электрической энергии для предприятий различных форм собственности, а также граждан-потребителей.

В процессе транспорта (передачи) и распределения электроэнергии возникают неизбежные технологические и коммерческие потери, учитываемые в кВт·ч или в процентах от общего передаваемого объема [2–4].

По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстата), абсолютные фактические потери электроэнергии в электрических сетях России составляют порядка 120 млрд кВт·ч в год. В отдельных распределительных электрических сетях объектов индивидуального жилья (коттеджи, поселки, села, деревни и т.п.) – 0,4–10 кВ, фактические потери электроэнергии уже достигают 60–70 % (при нормированном значении в 3–10 %).

Работы известных ученых (Железко Ю. С., Воротницкого В. Э., Москвитина И. Ю., Пейзель В. М., Бердина А. С., Иванова А. С., Идельчика В. И., Казанцева В. Н., Левина М. С., Гревцова О. И., Лещинской Т. Б., Маркушевича Н. С., Паздерина А. В., Красник В. В., Егорова А. О. и др.) направлены на развитие и оптимизацию систем учета и, как правило, предполагают полную автоматизацию с заменой приборов учета потребителей (что на законодательном уровне без согласия потребителя сделать невозможно) или направ-

лены на оптимизацию ручного сбора и обработки показаний, что в современных рыночных условиях и с учетом действующих нормативных документов делать неэффективно, а соответственно – нецелесообразно. Кроме того, в некоторых работах расчеты и выводы не подразумевают частичной автоматизации приборов учета абонентов, зачастую основаны на уже проведенных замерах во всех узлах и элементах сети, что в практическом смысле сделать весьма затруднительно и финансово нецелесообразно.

Значительное превышение фактических потерь над технологически обоснованными требует применения новых подходов, методов и моделей на долговременной и постоянной основе. Опыт создания подобных систем показывает, что даже при сравнительно благополучных относительных потерях электроэнергии в поселковых сетях временное ослабление внимания к ним неизменно приводит к росту потерь даже при наличии автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ).

Для эффективного контроля, анализа и управления распределением (потреблением) электрической энергии в секторе индивидуального жилья необходимо создавать системы учета, основываясь на методах системного анализа, которые будут связаны с обработкой большого объема как определенной, так и неопределенной информации, в связи с чем будем использовать методы математического моделирования на основе «теории нечетких множеств» [5].

Введем понятие системы контроля распределения электрической энергии (СКРЭЭ). Необходимость математического моделирования СКРЭЭ обусловлена важностью оценки объема фактических потерь электроэнергии для сетевого предприятия, выявления их источников в условиях технических и материальных ограничений и их устранение.

При решении указанной задачи предполагается разработка базовой математической модели СКРЭЭ, частью которой является общая модель СКРЭЭ, состоящая из базовых элементов (множеств), а именно: множество источников потерь электроэнергии (могут возникать в результате умышленного хищения электрической энергии, непреднамеренного изменения схемы учета или распределения электроэнергии, неправильной работы приборов учета электроэнергии и т.д.), множество элементов электрической сети объекта (т.е. те элементы сети, умышленное или непреднамеренное воздействие на которые может привести к возникновению потерь электрической энергии), а также множество средств и приборов учета (ПУ) электроэнергии, в том числе множество контрольных средств учета (КСУ) (средства и ПУ, которые помогут сетевому предприятию выявлять и нейтрализовать очаги потерь электроэнергии, а также повысить контроль за потреблением или распределением электроэнергии).

В представленной статье предлагается подход, позволяющий определить количественный и качественный состав технических СКРЭЭ объекта в зависимости от предполагаемого технического парка ПУ и элементов сети, а также источника возникновения потерь на основе экспертно-аналитического метода количественных приближенных оценок [6]. Данный подход, теоретическую базу которого составляет теория множеств и метода анализа иерархий, подробно описан в работе Т. Саати [7].

## 1. Формализованное описание СКРЭЭ

### 1.1. Элементы модели, их множества и соответствия

Как было указано выше, модель будет состоять из трех основных элементов (множеств):

- множество потерь электроэнергии (ЭЭ) – обозначим его  $A$ ;
- множество элементов сети – обозначим его  $B$ ;
- множество средств и ПУ (в том числе КСУ) – обозначим его  $C$ .

$A$ ,  $B$  и  $C$  – представлены в виде множества непересекающихся элементарных объектов, каждое из которых имеет одно или более дополнительных абстрактных множеств, наличие которых позволит повысить точность композиции соответствий рассматриваемой модели.

Схематичное описание модели представлено на рис. 1.

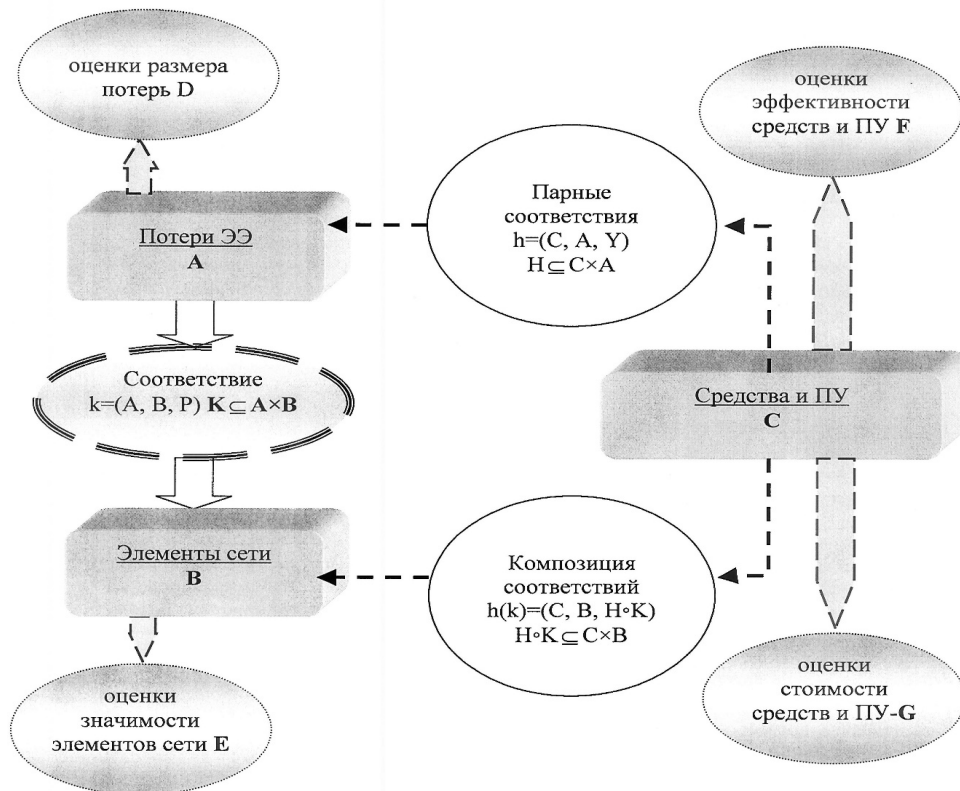


Рис. 1. Общая модель системы контроля распределения электрической энергии

Таким образом, определим дополнительные множества:

– для «множества потерь ЭЭ ( $A$ )» дополнительным множеством, определяющим критерии композиции соответствий, является «множество оценки величины потерь» ( $D$ ), элементы данного множества позволят определить экспертам для каждого вида потерь их размер и значимость для дальнейшего учета в расчетах;

– для «множества элементов сети ( $B$ )» дополнительным множеством, определяющим критерии композиции соответствий, является множество

«оценки значимости элементов сети « $E$ », элементы данного множества позволяют определить экспертам для каждого элемента сети возможность уязвимости и предположительные последствия от воздействия на конкретный элемент сети;

– для «множества средств и ПУ ( $C$ )» определим два дополнительных множества. Первое – это «множество оценок эффективности средств и ПУ», обозначим его как  $F$ . Элементы данного множества позволяют определить экспертам, на сколько то или иное средство и ПУ эффективно для выявления того или иного вида потерь электроэнергии и дальнейшего контроля за распределением и управлением электрической энергии. Второе – «множество оценок стоимости средств и ПУ» ( $G$ ). Данный критерий позволяет определить целесообразность применения того или иного средства и ПУ в зависимости от того или иного вида и размера потерь ЭЭ.

Рассматриваемые множества можно описать следующими свойствами:

- Множество «Потери ЭЭ»  $A = \{a_i | i = 1, X\}$ , где  $a_i$  – вид потерь ЭЭ, зависящий от элемента сети объекта. Под потерями ЭЭ можно понимать проявленные в любой форме намерения нанести физический, материальный или иной вред электрическому распределению электроэнергии. Например: искусственное замедление работы прибора учета электроэнергии, вмешательство в программные настройки электронных приборов учета, подключение к сети в обход прибора учета, «скрутка» или «отмотка» электросчетчика, подключение части абонентского электрооборудования в обход прибора учета, прокол самонесущего изолированного провода (СИП) и т.д.

- Множество «элементов сети объекта»  $B = \{b_j | j = 1, Y\}$ , где  $b_j$  – один из элементов сети, который является целью воздействия для создания (очага) потерь ЭЭ. Например, в секторе индивидуального жилья для граждан-потребителей таким элементом сети может быть счетчик электрической энергии, распределительные щитки, шкафы учета, линии электропередач и т.д.

- Множество средств и ПУ  $C = \{c_k | k = 1, Z\}$ , где  $c_k$  – средства учета, которые выполняет функцию полной или частичной идентификации возникновения потерь ЭЭ, например: счетчик электроэнергии индукционный или электронный, система учета с дистанционным сбором данных, высоковольтные ПКУ, счетчики с расщепленной архитектурой, КСУ на воздушных и кабельных линиях и т.д.

- Множество оценок размера потерь  $D = \{d_i | i = 1, X\}$ . В данном случае под «размером» понимают наибольшую вероятность появления максимального значения  $a_i$  потерь ЭЭ для рассматриваемого элемента сети (в зависимости от вида объекта, месторасположения, состояния и топологии сети и т.п.). Отображение элементов множества  $A$  на элементы множества  $D$  осуществляется по аналитическим или экспертным оценкам, т.е. осуществляется ранжирование и ограничение перечня возможного возникновения потерь ЭЭ.

- Множество оценок значимости элементов сети объекта  $E = \{e_j | j = 1, Y\}$ . Под «значимостью» в данном случае понимают оценку ущерба от реализации  $A_i$  угрозы на  $B_j$  элемент сети объекта. Соотношение множества элементов  $B$  и элементов  $E$  осуществляется по аналитическим или экспертным оценкам, осуществляется упорядочивание элементов сети объекта.

- Множество оценок эффективности средств и ПУ  $F = \{f_k | k = 1, Z\}$ . В данном случае «эффективность» означает реализацию условия  $C_k$  сред-

ством учета функций предотвращения возникновения потерь ЭЭ. Отображение элементов множества  $C$  на множество  $F$  осуществляется по экспертным заключениям.

• Множество оценок стоимости средств и ПУ  $G = \{g_k \mid k = 1, Z\}$ . Под «стоимостью» понимаем денежные средства на покупку, монтаж и эксплуатацию  $Ck$  средства учета. Отображение элементов множества  $C$  и множества  $G$  выполняется на основании оценок экспертов.

Рассматривая три множества  $A$ ,  $B$  и  $C$ , установим соотношения между ними:

– множество «средств и ПУ  $C$ » соответствует множеству «потерь ЭЭ  $A$ » представляется в виде множества  $H \subseteq C \times A$ , определяющего закон, который выражает: насколько эффективно блокируется каждый вид потерь ЭЭ каждым средством учета. Для одного средства и ПУ будут определены  $X$  коэффициентов соответствия  $h_{ki}$  ( $i = 1, X$ ) – оценок эффективности предотвращения  $i$ -го вида потерь в элементе сети объекта  $k$ -м средством учета;

– соответствие множества потерь  $A$  множеству элементов сети объекта  $B$  представляется в виде множества  $K \subseteq A \times B$ , определяющего закон, который указывает: насколько каждый вид потерь ЭЭ сопоставим для каждого элемента сети. Для одного вида потерь будут определены  $Y$  коэффициентов соответствия  $k_{ij}$  ( $j = 1, Y$ ) – оценок вероятности возникновения  $i$ -го вида потерь по отношению к  $j$ -му элементу сети объекта;

– соответствие множества средств учета  $C$  множеству элементов сети  $B$  представляется в виде множества  $F \subseteq C \times B$ , определяющего закон, который указывает: какие средства учета электрической энергии будут более эффективно контролировать определенную зону объекта в зависимости от нацеленных воздействий на элементы сети объекта. Для каждого средства учета необходимо получить  $Y$  коэффициентов соответствия  $f_{kj}$  ( $j = 1, Y$ ) – оценок необходимости защиты  $j$ -го элемента сети объекта  $k$ -м средством или ПУ.

## 1.2. Основное правило решения на основе композиции соответствий

Для композиции четких соответствий основным является операция с тремя множествами  $A$ ,  $B$  и  $C$ , для которых определены два соответствия:

$$\left. \begin{aligned} h &= (A, B, H), H \subseteq A \times B \\ k &= (B, C, K), K \subseteq B \times C \end{aligned} \right\}$$

При этом область значений первого соответствия совпадает с областью определения второго соответствия. Таким образом, первое соответствие определяет для любого  $A$  некоторый, и, как правило, не один, элемент  $B$ . Согласно определению операции композиции соответствий теперь нужно для найденного  $B$  определить  $C$ , воспользовавшись вторым соответствием. Таким образом, композиция соответствий сопоставляет с каждым элементом  $A$  из области определения первого соответствия один или несколько элементов  $C$  из области значений второго соответствия.

Композицию соответствий  $h$  и  $k$  будем обозначать  $h(k)$ , а закон композиции соответствий через  $H^\circ K$ . При этом композиция соответствий запишется в виде

$$h(k) = (A, C, H^\circ K), H^\circ K \subseteq A \times C.$$

Аналогично композицией нечетких соответствий  $A = (A, B, H)$  и  $B = (B, C, K)$  называется нечеткое соответствие  $C = (A, C, E)$ , обозначаемое  $C = A \circ B$ , у которого область отправления совпадает с областью отправления соответствия  $A$ , область прибытия – с областью прибытия соответствия  $B$ , а графиком  $E$  является композиция графиков  $H$  и  $P$ .

Так как нечеткие соответствия являются нечеткими множествами, композиция соответствий рассчитывается согласно теории нечетких множеств. Если  $F = \{(\mu_F(a, b) / (a, b)) \mid (a, b) \in A \times B\}$  – нечеткое подмножество  $A \times B$ , а  $K = \{(\mu_K(b, c) / (b, c)) \mid (b, c) \in B \times C\}$  – нечеткое подмножество  $B \times C$ , то композицией нечетких множеств  $F$  и  $P$  называется нечеткое множество  $F \circ K$ :

$$F \circ K = \{(\mu_{F \circ K}(a, c) / (a, c)) \mid (a, c) \in A \times C,$$

где  $\mu_{F \circ K}(a, c) = Y(\mu_F(a, b) \& \mu_K(b, c)), a \in A, c \in C, b \in B$ .

Отсюда следует, что степень принадлежности пары  $(A, C) \in A \times C$  нечеткому множеству  $F \circ K$  равна наибольшей из минимумов степеней принадлежности различных комбинируемых пар  $(A, B) \in A \times B$  и  $(B, C) \in B \times C$  нечетким множествам  $F$  и  $P$ , где в качестве  $B$  могут выступать несколько комбинируемых элементов [8].

В рассматриваемой модели решающее правило представляет собой композицию соответствий с тремя множествами: соответствие множества средств и ПУ  $C$  множеству потерь ЭЭ  $A - h = (C, A, H), H \subseteq C \times A$ ; соответствие множества потерь ЭЭ  $A$  множеству элементов сети объекта  $B - K = (A, B, K), K \subseteq A \times B$ ; композиция соответствий  $h$  и  $K$  запишется в виде  $h(K) = (C, B, H \circ K), H \circ K \subseteq C \times B$  есть распределение элементов множества  $C$  на элементы множества  $B$ , т.е. какое средство или ПУ необходимо установить в конкретный элемент сети объекта.

### 1.3. Реализация предложенной модели на примере

Рассмотрим пример определения требуемого состава СКРЭЭ в секторе индивидуального жилья с учетом юридических лиц – потребителей электроэнергии.

Предложенные выше множества можно разделить на следующие основные группы:

1. Множество видов коммерческих потерь ЭЭ:  $A_1$  – внешние воздействия на прибор учета электроэнергии (магнит, пленка, проволока и т.д.), приводящие к сверхнормативной отрицательной погрешности измерений – «внешнее воздействие на ПУ» или «ВВ»;  $A_2$  – вмешательство в программные настройки электронных приборов учета (перепрограммирование счетчиков, коммуникаторов, концентраторов, накопителей, контроллеров и т.д.) – «перепрограммирование» или «ПП»;  $A_3$  – преднамеренное нарушение схемы учета электроэнергии при подключении прибора учета – «изменение схемы» или «ИС»;  $A_4$  – преднамеренное уменьшение показаний прибора учета и иные действия, приводящие к искажению данных об объеме потребления электроэнергии – «уменьшение показаний» «УП»;  $A_5$  – подключение к электрической сети в обход прибора учета, «наброс» на линию электропередач, прокол самонесущего изолированного провода (СИП) и т.д. – бездоговорное, без учетное потребление либо потребление с нарушением условий действующего договора – «обход прибора» или «ОП».

2. Множество элементов сети объекта:  $B_1$  – приборы учета электроэнергии индукционные – «ПУ индукционные» или «ПУИ»;  $B_2$  – приборы учета электроэнергии электронные – «ПУ электронные» «ПУЭ»;  $B_3$  – промежуточные клеммники и распределительные щитки – «клеммники и щитки» или «КиЩ»;  $B_4$  – линии электропередач (кабельные и воздушные) – «ЛЭП»,  $B_5$  – промежуточные контроллеры и концентраторы «контроллеры и концентраторы» или «КиК»;  $B_6$  – распределительные устройства и электроустановки «РУ и электроустановки» «РУЭ».

3. Множество средств и ПУ:  $C_1$  – электронно-цифровые приборы учета «ЭЦ ПУ»;  $C_2$  – приборы учета с дистанционным сбором данных – «ПУ ДСД»;  $C_3$  – приборы учета с накоплением и хранением информации (многофункциональные) – «ПУ МФУ»;  $C_4$  – многофункциональные приборы учета с контролем и ограничением мощности – «ПУ ОМО»;  $C_5$  – промежуточные контрольные узлы учета для линий электропередач – «ПКУ».

Находим оценки вероятности появления потерь по отношению к  $b_1$  элемента сети – коэффициенты соответствия  $k_{11}, k_{21}, k_{31}, k_{41}, k_{51}$ . Матрица парных сравнений для элемента сети «ПУ индукционные» показана в табл. 1. Коэффициенты определяются вычислением вектора приоритетов по матрице парных сравнений следующим способом: перемножить элементы строки, извлечь корень степени, равной количеству элементов в строке, и нормализовать полученные для каждой строки числа. Первый элемент результирующего вектора будет приоритетом первого объекта, второй – второго и т.д. Данный способ позволяет получить достаточно точное значение вектора приоритетов для небольших матриц [6]. В результате получаем оценки:

$$k_{11} = 0,3389, k_{21} = 0,0425, k_{31} = 0,1092, k_{41} = 0,1795, k_{51} = 0,3300.$$

Таблица 1

Матрица парных сравнений для определения оценок вероятности возникновения потерь для элемента сети «ПУ индукционные»

	<b>ВВ</b>	<b>ПП</b>	<b>ИС</b>	<b>УП</b>	<b>ОП</b>
<b>ВВ</b>	1	8	3	2	1
<b>ПП</b>	1/8	1	1/3	1/4	1/7
<b>ИС</b>	1/3	3	1	1/2	1/3
<b>УП</b>	1/2	4	2	1	1/2
<b>ОП</b>	1	7	3	2	1

Подобным образом находим значение вероятности появления потерь по отношению ко всем элементам сети объекта  $k_{ij}$  (результаты отображены в табл. 2); оценки эффективности применяемых средств и ПУ электроэнергии  $h_{ki}$  (табл. 3); оценки значимости величины потерь:  $d_1 = 0,0868, d_2 = 0,0868, d_3 = 0,1576, d_4 = 0,3242, d_5 = 0,3242$ ; оценки значимости элементов сети:  $e_1 = 0,0634, e_2 = 0,0369, e_3 = 0,1938, e_4 = 0,1938, e_5 = 0,1196, e_5 = 0,2379$ ; оценки эффективности средств и ПУ:  $f_1 = 0,3265, f_2 = 0,3265, f_3 = 0,2319, f_4 = 0,0846, f_5 = 0,4861$ ; оценки стоимости средств и ПУ:  $g_1 = 0,2689, g_2 = 0,3080, g_3 = 0,2689, g_4 = 0,0996, g_5 = 0,3080$ .

В соответствии с методом анализа иерархий Т. Саати, для выявления общей оценки каждого объекта нужно найти произведение веса оценки этого объекта по некоторому критерию на вес этого критерия [6].



Таблица 2

Оценки вероятности потерь ЭЭ по отношению к элементам сети объекта

	<b>ВВ</b>	<b>ПП</b>	<b>ИС</b>	<b>УП</b>	<b>ОП</b>
<b>ПУИ</b>	0,3389	0,0425	0,1092	0,1795	0,3300
<b>ПУЭ</b>	0,0817	0,2261	0,2261	0,0817	0,3844
<b>КиЩ</b>	0,3491	0,0501	0,3994	0,0501	0,1513
<b>ЛЭП</b>	0,0667	0,0667	0,2000	0,0667	0,6000
<b>КиК</b>	0,2402	0,5269	0,0776	0,0776	0,0776
<b>РУЭ</b>	0,0659	0,0659	0,4954	0,0659	0,3068

Таблица 3

Оценки эффективности средств и ПУ

	<b>ВВ</b>	<b>ПП</b>	<b>ИС</b>	<b>УП</b>	<b>ОП</b>
<b>ЭЦ ПУ</b>	0,3333	0,3333	0,1111	0,1111	0,1111
<b>ПУ с ДСД</b>	0,1609	0,1609	0,3103	0,3103	0,3103
<b>ПУ МФУ</b>	0,1679	0,3127	0,3127	0,0387	0,1679
<b>ПУ ОМО</b>	0,1463	0,2725	0,2725	0,0362	0,2725
<b>ПКУ</b>	0,0520	0,0520	0,3331	0,0520	0,5110

Имея результаты коэффициентов соответствий  $k_{ij}$  и  $h_{ki}$ , получим следующие оценки:

$g_{ij}$  – результат величины вероятности появления потерь ЭЭ в отношении всех элементов сети объекта относительно значимости величины потерь:

$$g_{ij} = k_{ij} \times d_i,$$

где  $i$  – номер варианта потерь ЭЭ;  $j$  – номер элемента сети объекта;

$h_{ki}$  – величина эффективности выявления потерь ЭЭ каждого средства или прибора учета по отношению ко всем видам потерь с учетом оценок эффективности средств учета и оценок стоимости этих средств:

$$h_{ki} = h_{ki} / g_k \times f_k,$$

где  $k$  – номер средства учета;  $i$  – номер варианта потерь.

Воспользуемся значением, обратным величине стоимости  $g_k$ , так как предпочтение выбранного средства учета над другими будет тем выше, чем меньше затраты на него. Выражение  $1/g_k$  является оценкой «дешевизны» средства учета.

Далее проводится расчет композиции соответствий. Произведение матриц коэффициентов  $K_{ij}$  соответствия множества потерь ЭЭ  $A$  множеству элементов сети  $B$  и коэффициентов  $h_{ki}$  соответствия множества средств учета  $C$  множеству потерь  $A$  дает матрицу коэффициентов  $f_{kj}$  соответствия множества средств учета  $C$  множеству элементов сети объекта  $B$ .

Произведение матриц осуществляется по формуле

$$f_{kj} = \sum_{i=1, N} (g_{ij} \times h_{ki}).$$

Итоговые оценки  $o_{kj}$  – оценка эффективности защиты каждым средством учета всех элементов сети объекта с учетом оценок значимости величины потерь:

$$o_{kj} = f_{kj} \times e_j,$$

где  $k$  – номер средства учета;  $j$  – номер элемента сети объекта.

В табл. 4 отображен результат.

Таблица 4

Оценки эффективности выявления потерь каждым средством учета всех элементов сети объекта с учетом оценки значимости величины потерь

	ЭЦ ПУ	ПУ с ДСД	ПУ МФУ	ПУ ОМО	ПКУ
<b>ПУИ</b>	0,1217	0,2215	0,3894	0,2215	0,0459
<b>ПУЭ</b>	0,0577	0,1609	0,3103	0,3103	0,1609
<b>КиЩ</b>	0,0760	0,2197	0,2197	0,4086	0,0760
<b>ЛЭП</b>	0,0454	0,1239	0,1239	0,2389	0,4679
<b>КиК</b>	0,0577	0,1609	0,1609	0,3103	0,3103
<b>РУЭ</b>	0,0903	0,2611	0,4681	0,0903	0,0903

Из полученных итоговых оценок можно сделать вывод о необходимых средствах учета, которые должны быть установлены в каждом элементе сети объекта. Чем выше оценка средства учета, тем выше необходимость установки данного средства. В каждом элементе сети нужно использовать только средства с высокой оценкой. Эксперты могут выбрать, насколько значимой должен быть показатель, чтобы считать средство учета необходимым для установки. В приведенном условном примере используем ограничение на величину оценки, равное 0,1. Оценивая и сравнивая полученные данные, делаем вывод: если полученный результат меньше указанного числа, то его эффективность применения считается низкой и такое средство не рекомендуется для установки. В итоге состав СКРЭЭ на объекте будет следующий (табл. 5).

Таблица 5

Состав СКРЭЭ на объекте

<b>ПУИ</b>	<b>ПУЭ</b>	<b>КиЩ</b>	<b>ЛЭП</b>	<b>КиК</b>	<b>РУЭ</b>
ЭЦ ПУ	ПУ с ДСД	ПУ с ДСД	ПУ с ДСД	ПУ с ДСД	ПУ с ДСД
ПУ с ДСД	ПУ МФУ	ПУ МФУ	ПУ МФУ	ПУ МФУ	ПУ МФУ
ПУ МФУ	ПУ ОМО	ПУ ОМО	ПУ ОМО	ПУ ОМО	
ПУ ОМО	ПКУ		ПКУ	ПКУ	

## 2. Построение модели СКРЭЭ на основе нечетких соответствий четких множеств

### 2.1. Применяемые множества для построения модели

В состав данной модели входит набор множеств, подобный набору из предыдущей модели. Перечислим их с указанием различий между моделями:

1) множество потерь ЭЭ  $A = \{a_i | i = 1, X\}$ .

2) множество обстановок  $T = \{t_e | e = 1, A\}$ . Содержит уровни благоприятности обстановки для воздействия на элементы сети объекта, включающем в себя месторасположение элемента объекта. Например, обстановка неудовлетворительная – в случае возможности прямого доступа (и воздействия)

абонента к приборам учета и элементам сети при отсутствии возможности контроля со стороны сетевого предприятия, удовлетворительная – в случае ограниченной возможности доступа (и воздействия) абонента к приборам учета и элементам сети при наличии возможности контроля со стороны сетевого предприятия, хорошая – в случае отсутствия возможности прямого доступа (и воздействия) абонента к приборам учета и элементам сети при наличии возможности контроля со стороны сетевого предприятия;

3) множество элементов сети объекта  $B = \{b_j | j = 1, F\}$ ;

4) множество категорий потребителей объекта  $H = \{h_u | u = 1, B\}$ . Содержит набор категорий потребителей объекта, определяемых по вероятности возникновения значительных коммерческих потерь. По результатам анализа данного множества составляется список, в котором по каждому коммерческому присоединению рассчитана величина вероятного ущерба от недоучета электроэнергии. Например: категория низкая, средняя, высокая;

5) множество средств и приборов учета  $C = \{c_k | k = 1, Z\}$ ;

6) множество эффективностей средств учета  $F = \{f_Y | Y = 1, C\}$ . Содержит уровни эффективности средств учета для выявления различного вида потерь. Например: эффективность низкая, средняя, высокая;

7) множество стоимостей средств учета  $G = \{e_w | w = 1, D\}$ . Содержит уровни затрат, требуемых на установку и обслуживание средств учета. Например: затраты низкие, средние, высокие.

## 2.2. Нечеткие соответствия рассматриваемой модели

В данной модели можно определить следующие соответствия:

1) соответствие множества средств учета  $C$  множеству потерь  $A$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_1$  в  $C \times A$ , по которому осуществляется нечеткое соответствие между  $C$  и  $A$ . Функция принадлежности  $\mu_{Q_1}(c_k, a_i)$  будет указывать: насколько эффективно каждый вид потерь ЭЭ будет выявляться выбранным средством учета. При этом  $\mu_{Q_1}(c_k, a_i) = 0$  означает, что потери ЭЭ совершенно не выявляются (соответствия нет), а  $\mu_{Q_1}(c_k, a_i) = 1$  – потери ЭЭ выявляются полностью.

Аналогично описываем следующие соответствия:

2) соответствие множества потерь ЭЭ  $A$  множеству элементов сети  $B$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_2$  в  $A \times B$ ;

3) соответствие множества средств учета  $C$  множеству элементов сети  $B$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_3$  в  $C \times B$ ;

4) соответствие множества потерь ЭЭ  $A$  множеству обстановок  $T$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_4$  в  $A \times T$ ;

5) соответствие множества элементов сети  $B$  множеству категорий потребителей объекта  $H$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_5$  в  $B \times H$ ;

6) соответствие множества средств учета  $C$  множеству эффективностей средств учета  $F$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_6$  в  $C \times F$ ;

7) соответствие множества средств учета  $C$  множеству стоимостей средств учета  $G$ , определяющееся нечетким множеством  $Q_7$  в  $C \times G$ .

По функции принадлежности нечеткого множества  $Q_4$  соответствия множества потерь ЭЭ  $A$  множеству обстановок  $T$  можно определить пары соответствий, которые должны быть исключены из множества потерь ЭЭ как невозможные или маловероятные. Такие варианты имеют близкий к 0 коэффициент соответствия.

Таким образом, можно исключить из набора переменных некоторые элементы сети и средства учета с учетом категории потребителей, т.е. не требующие сокращения потерь ЭЭ и средства учета с низкой эффективностью или с недопустимо высокими затратами на их приобретение и эксплуатацию.

### 2.3. Итоговые значения модели расчетов

Состав элементов для данных множеств определен в соответствии с предыдущей моделью. Как и в предыдущем примере, по значению параметра соответствия нечеткого множества средств учета  $S$  множеству элементов сети объекта  $B$  можно сделать вывод о необходимых средствах учета, которые должны быть установлены в каждом элементе сети объекта. В табл. 6 представлен полученный состав СКРЭЭ на конкретном объекте.

Таблица 6  
Состав СКРЭЭ на объекте по модели на основе нечетких соответствий

ПУИ	ПУЭ	КиЩ	ЛЭП	КиК	РУЭ
					ПУ с ДСД
ПУ с ДСД	ПУ МФУ	ПУ МФУ		ПУ МФУ	ПУ МФУ
ПУ МФУ	ПУ ОМО	ПУ ОМО	ПУ ОМО	ПУ ОМО	
			ПКУ	ПКУ	

## 3. Нечеткие множества в составе модели СКРЭЭ

### 3.1. Определение составляющих модели

1. Определим множество «Коммерческие потери элемента сети».

Представим, что универсальное множество «Потери»  $A$  в конкретном примере будет содержать все существующие виды потерь ЭЭ. Тогда в нечеткое множество  $\tilde{A} = \{(\mu_A(a) / a)\}$ , где  $a \in A$  соответствует нечеткому понятию «Коммерческие потери элемента сети». Элементами данного множества будут являться нечеткие переменные: «внешнее воздействие на ПУ», «перепрограммирование», «изменение схемы», «уменьшение показаний», «обход прибора». Значение элемента  $\mu_A(A)$  указывает величину влияния конкретного вида потерь ЭЭ для каждого конкретного случая или насколько конкретный вид потерь ЭЭ вероятен для характерного элемента сети.

Далее рассмотрим:

2. Множество «обстановки для воздействия на элементы сети объекта»  $\tilde{G} = \{(\mu_G(g) / g)\}$ .

3) Множество «Элементы сети объекта»  $\tilde{B} = \{(\mu_B(b) / b)\}$ .

4) Множество «Категорий потребителей объекта»  $\tilde{H} = \{(\mu_H(h) / h)\}$ .

5) Множество «средства и ПУ»  $\tilde{C} = \{(\mu_C(c) / c)\}$ .

6) Множество «Эффективности средств и ПУ»  $\tilde{F} = \{(\mu_F(f) / f)\}$ .

7) Множество «Стоимости средств учета»  $\tilde{E} = \{(\mu_E(e) / e)\}$ .

### 3.2. Набор соответствий модели нечетких множеств

Определим соответствие множеству «Коммерческие потери элемента сети»  $\tilde{A}$ , для него таковым будет являться множество «средства и ПУ учета»  $\tilde{C}$  и определяющееся нечетким множеством  $\tilde{O}_1$ , базовое множество которого

$C \times A$ . Функция принадлежности  $\mu_{O1}(C_k, A_i)$  будет указывать, насколько необходимо каждый вид потерь ЭЭ выявлять каждым средством учета. При этом  $\mu_{O1}(C_k, A_i) \approx 0$  означает, что определенный вид потерь совершенно не нужно выявлять данным средством учета, а  $\mu_{O1}(C_k, A_i) \approx 1$  – вид потерь, которые необходимо выявлять, используя данное средство учета.

Аналогично определяем остальные соответствия:  $\tilde{O}_2$  – соответствие множества  $\tilde{X}$  множеству  $\tilde{Y}$ ;  $\tilde{O}_3$  – соответствие множества  $\tilde{Z}$  множеству  $\tilde{Y}$ ;  $\tilde{O}_4$  – соответствие множества  $\tilde{X}$  множеству  $\tilde{T}$ ;  $\tilde{O}_5$  – соответствие множества  $\tilde{Y}$  множеству  $\tilde{Q}$ ;  $\tilde{O}_6$  – соответствие множества  $\tilde{Z}$  множеству  $\tilde{G}$ ;  $\tilde{O}_7$  – соответствие множества  $\tilde{Z}$  множеству  $\tilde{S}$ .

### 3.3. Результаты расчета созданной модели

Чтобы определить элементы модели нечетких множеств, используем метод анализа иерархий Т. Саати. Так, например, множество «Умышленные потери физического элемента сети объекта» содержит элементы:  $A_1$  – «внешнее воздействие на ПУ»  $\mu_A(A_1) = 0,9$ ;  $A_2$  – «перепрограммирование»  $\mu_A(A_2) = 0,8$ ;  $A_3$  – «изменение схемы»  $\mu_A(A_3) = 0,6$ ;  $A_4$  – «уменьшение показаний»  $\mu_A(A_4) = 0,5$ ;  $A_5$  – обход прибора»  $\mu_A(A_5) = 0,2$ .

В табл. 7 представлен состав СКРЭЭ.

Таблица 7

Состав СКРЭЭ на объекте по модели на основе нечетких множеств

ПУИ	ПУЭ	КиЩ	ЛЭП	КиК	РУЭ
ЭЦ ПУ		ПУ с ДСД			
ПУ с ДСД	ПУ МФУ	ПУ МФУ		ПУ МФУ	ПУ МФУ
	ПУ ОМО	ПУ ОМО			
		ПКУ	ПКУ	ПКУ	

### Заключение

Применение подобного подхода, основанного на методе экспертных оценок в совокупности с методом анализа иерархий и композиции соответствий множеств, позволяет определить состав средств и приборов учета для выявления и сокращения как технических, так и коммерческих потерь электроэнергии в условиях материальных и технических ограничений при различных существующих условиях обеспеченности сектора индивидуального жилья средствами учета электроэнергии. Разработка и применение данной модели могут быть основаны на теории обычных и нечетких множеств.

Анализ полученных результатов показал, что в разных условиях при использовании разных данных можем получить различные друг от друга результаты, что подтверждает универсальность данного подхода к решению индивидуальных задач построения СКРЭЭ.

### Библиографический список

1. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. X 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». С изменениями и дополнениями от 16 декабря 2015 г. – М., 2015.

2. **Железко, Ю. С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.
3. **Воротницкий, В. Э.** Снижение потерь электроэнергии – важнейший путь энергосбережения в электрических сетях / В. Э. Воротницкий // Энергосбережение. – 2014. – № 3. – 61–64 с.
4. **Сапронов, А. А.** Анализ структуры коммерческих потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях / А. А. Сапронов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 4. – С. 47–49.
5. **Коньшева, Л. К.** Основы теории нечетких множеств : учеб. пособие / Л. К. Коньшева, Д. М. Назаров. – СПб. : Питер, 2011. – 192 с.
6. **Саати, Т. Л.** Взаимодействие в иерархических системах / Т. Л. Саати // Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 68–84.
7. **Саати, Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. **Мелихов, А. Н.** Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1990. – 272 с.

### *References*

1. *Ukaz Prezidenta RF ot 7 iyulya 2011 g. X 899 «Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologii Rossiyskoy Federatsii». S izmeneniyami i dopolnennyami ot 16 dekabrya 2015 g.* [The decree of the President of the Russian Federation from 7<sup>th</sup> of July 2011 X899 “On the approval of priority lines of scientific and technological development in the Russian Federation and a list of critical technologies of the Russian Federation. With amendments and supplements from 16<sup>th</sup> of December 2015]. Moscow, 2015.
2. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity. Reactive power. The quality of electricity: guidelines for practical calculations]. Moscow: ENAS, 2009, 456 p.
3. Vorotnitskiy V. E. *Energoberezhenie* [Energy saving]. 2014, no. 3, 61–64 p.
4. Sapronov A. A. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water preparation]. 2006, no. 4, pp. 47–49.
5. Konyshcheva L. K., Nazarov D. M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv: ucheb. posobie* [Fundamentals of the fuzzy sets theory: teaching aid]. Saint-Petersburg: Piter, 2011, 192 p.
6. Saati T. L. *Tekhnicheskaya kibernetika* [Engineering cybernetics]. 1979, no. 1, pp. 68–84.
7. Saati T. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision making. Method for analyzing hierarchies]. Transl. from English by R. G. Vachnadze. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 278 p.
8. Melikhov A. N., Bershteyn L. S., Korovin S. Ya. *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoy logikoy* [Situational consulting systems with fuzzy logic]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat.lit., 1990, 272 p.

---

**Подлесных Максим Юрьевич**  
заместитель директора, Оренбургский  
филиал ООО «Газпром энерго»  
(Россия, г. Оренбург, ул. Донгузская, 26)  
E-mail: ofgpe@rambler.ru

**Podlesnykh Maksim Yur'evich**  
Deputy director, Orenburg branch  
of “Gazprom energo” (26 Donguzskaya  
street, Orenburg, Russia)

**Боровский Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой управления  
и информатики в технических системах,  
Оренбургский государственный  
университет (Россия, г. Оренбург,  
пр. Победы, 13)

E-mail: borovski@mail.ru

**Borovskiy Aleksandr Sergeevich**  
Doctor of engineering sciences, associate  
professor, head of the sub-department  
of informatics and technical systems  
control, Orenburg State University  
(13 Pobedy avenue, Orenburg, Russia)

---

УДК 004. 891

**Подлесных, М. Ю.**

**Интегрированный подход к разработке модели распределения средств учета электроэнергии на основе теории множеств / М. Ю. Подлесных, А. С. Боровский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 1 (45). – С. 39–53. – DOI 10.21685/2072-3059-2018-1-4.**