

УДК 519.81:621.311

## АГРЕГИРОВАНИЕ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ

Муравьев Сергей Васильевич<sup>1</sup>,  
muravyov@tpu.ru

Борисова Мария Андреевна<sup>1</sup>,  
marits@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что систематическое проведение энергетических обследований электрических сетей с целью выявления потерь электроэнергии составляет основу энергосбережения и энергоэффективности. Обработка результатов энергетических обследований представляет собой работу с большим объемом неструктурированных данных, которые плохо поддаются полному учету.

**Цель исследования:** рассмотрение возможности решения проблемы обработки результатов энергетических обследований на основе агрегирования предпочтений, что может обеспечить эффективное сжатие данных без потери информации и наглядную визуализацию результатов энергоаудита.

В качестве **объектов** исследования рассмотрены магистральные электрические сети, входящие в Единую национальную электрическую сеть России. Магистральные электрические сети, в свою очередь, состоят из предприятий магистральных электрических сетей, каждое из которых объединяет большое количество подстанций. Данные ежегодных энергетических обследований магистральных электрических сетей России содержатся в базе ПАО «ФСК ЕЭС».

**Методы.** Предложен основанный на агрегировании предпочтений метод, позволяющий представить большой объем данных инструментальных обследований потери энергии подстанциями сетей распределения электрической энергии в форме компактной интегральной оценки в порядковой шкале, удобной для принятия решений и визуализации. Обсуждается применение предложенного метода для анализа реальных данных энергетического обследования магистральных электрических сетей России.

**Результаты.** Метод позволяет выявить источники экономически неоправданных затрат энергетических ресурсов и неоправданных потерь энергии, обеспечить сжатие больших объемов данных энергообследований без потери существенной информации. Предложенный метод может стать удобным перспективным инструментом для организаций, занимающихся энергоконсалтингом.

### Ключевые слова:

Энергоаудит, потери электроэнергии, агрегирование предпочтений, отношение консенсуса, правило Кемени.

### Введение

Основной задачей проведения энергетических обследований является расчет потерь электроэнергии на электрических подстанциях. Являясь одним из распространенных видов георесурсов, электрическая энергия обладает уникальной особенностью, заключающейся в том, что ее транспортировку от мест производства до мест потребления можно осуществить за счет расхода части самой передаваемой энергии. По этой причине ее потери неизбежны. Однако важно, чтобы эти потери не превышали экономически обоснованного уровня. Под потерями подразумевается разница между отпущенной потребителям электроэнергией и фактически поступившей к ним [1].

Международные рекомендации в области энергетики требуют, чтобы в процессе передачи электроэнергии в электрических сетях потери не превышали 4 % [1], однако фактические потери магистральных электрических сетей, как правило, составляют не менее 10 %. Значимой составляющей фактических потерь является расход электрическими подстанциями энергии на собственные нужды [2].

Традиционно обработка результатов энергетических обследований представляет собой работу с большим объемом неструктурированных данных

[3], которые плохо поддаются полному учету. Примеры возникающих при этом проблем методологического и вычислительного характера можно найти в ряде работ, например, в [4–10]. В таких случаях традиционно используются методы многокритериального выбора, такие, например, как метод обобщенного показателя качества или метод анализа иерархий [11], которые реализуют сравнение анализируемых объектов на основе взвешенной суммы частных показателей. Однако эти методы страдают субъективизмом, т. к. не поддаются серьезной аксиоматизации, и могут приводить к ошибочным решениям [12, 13]. Этим недостаткам удастся избежать при применении агрегирования предпочтений [14], основанного на обработке исключительно бинарных отношений, не требующей вычисления весов, и дающего компактную интегральную оценку объектов в порядковой шкале. Применительно к энергоаудиту, агрегирование предпочтений обеспечивает возможность эффективного сжатия данных без потери информации и их наглядную визуализацию.

### Агрегирование предпочтений

Пусть задано множество  $t$  ранжирований  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$   $n$  объектов (альтернатив) из мно-

жества  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Каждое ранжирование имеет вид цепочки и задает отношение предпочтения

$$\lambda_k=(a_1 \succ a_2 \dots \sim a_s \sim a_t \succ \dots \sim a_n) \quad (1)$$

на множестве  $A$ . Отношение предпочтения  $\lambda$  является объединением двух отношений: отношения строгого предпочтения  $\rho$ , т. е.  $a_i \succ a_j$ , и отношения толерантности  $\tau$ , т. е.  $a_i \sim a_j$ , т. е.

$$\Lambda=\rho \cup \tau. \quad (2)$$

Множество  $\Lambda$  ранжирований вида (2) будем называть *профилем предпочтения* для заданных  $m$  и  $n$ .

Агрегировать  $m$  предпочтений, заданных на множестве  $n$  альтернатив, означает определить единственное отношение предпочтения  $\beta$ , называемое *ранжированием консенсуса*, которое обеспечивает между ранжированиями исходного профиля наилучший компромисс. Трактовка понятия «наилучший компромисс» определяется используемым при нахождении ранжирования консенсуса *правилом* агрегирования предпочтений. В данной работе будем использовать *правило Кемени* [15, 16], состоящее в нахождении такого строгого порядка (ранжирования Кемени)  $\beta$  альтернатив, что расстояние  $D(\beta, \Lambda)$  (определенное в терминах числа парных несоответствий между ранжированиями) от  $\beta$  до ранжирований исходного профиля  $\Lambda$  минимально для всех возможных строгих порядков (перестановок) альтернатив.

Правило Кемени допускает существование неединственного ранжирования консенсуса: число  $N$  найденных по этому правилу ранжирований консенсуса может достигать значений более  $10^7$  даже для небольших  $m=4$  и  $n=15$  [17]. Для приведения множества ранжирований консенсуса  $V=\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$  к единственному итоговому ранжированию консенсуса  $\beta_{fin}$  будем использовать следующее *правило свертки*:

пусть *ранг*  $r_i^k$  – это позиция альтернативы  $a_i$  в ранжировании консенсуса  $\beta_k$ ; тогда в итоговом ранжировании консенсуса  $\beta_{fin}$  альтернативы  $a_i$  располагаются в порядке возрастания сумм их рангов  $\sum_{k=1}^N r_i^k$  в ранжированиях консенсуса из  $V$ ; в итоговом ранжировании консенсуса  $\beta_{fin}$  две альтернативы  $a_i$  и  $a_j$  являются толерантными, т. е.  $a_i \sim a_j$ , если они имеют одинаковые суммы рангов в ранжированиях консенсуса из  $V$ .

Для нахождения всех возможных ранжирований консенсуса для заданного исходного профиля предпочтений будем использовать рекурсивный алгоритм собственной разработки RECURSALL, реализующий рекурсивный метод ветвей и границ [18].

При применении правила Кемени следует учитывать, что задача нахождения отношения консенсуса является  $NP$ -полной, т. е. характеризующейся экспоненциальным ростом времени решения в зависимости от размерности  $n=|A|$  задачи [18]. Заметим, что при подходящей для практиче-

ского применения размерности задачи  $n \leq 20$  алгоритм RECURSALL позволяет находить все ранжирования консенсуса за приемлемое время – порядка нескольких миллисекунд. В ситуациях, где  $n > 20$ , следует прибегать к разбиению множества  $A$  на непересекающиеся подмножества  $A_i$ , т. е.

$$A=A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k, \quad \bigcap_{i=1}^k A_i \neq \emptyset, \quad \text{где } |A_i| \leq 20, \quad i=1, \dots, k.$$

Операция разбиения множества  $A$  приводит к декомпозиции профиля предпочтений  $\Lambda$ , тем самым преобразуя его структуру из линейной в двухуровневую, а при неоднократном повторении этой операции – в иерархическую. Ранжирования консенсуса  $\beta_i$ , найденные на множестве  $A_i$ , войдут в состав профиля вышестоящего уровня иерархии, для которого также может быть найдено ранжирование консенсуса. Процесс продолжается до достижения наивысшего уровня иерархии.

#### Обработка данных энергетических обследований агрегированием предпочтений

Правило Кемени и алгоритм RECURSALL были положены авторами в основу предлагаемого метода анализа данных энергетических обследований элементов Единой национальной электрической сети России. Для краткости будем обозначать этот метод аббревиатурой АПЭО (*агрегирование предпочтений в энергетических обследованиях*).

Единая национальная электрическая сеть России состоит из восьми *магистральных электрических сетей* (МЭС), каждая из которых обладает иерархической структурой. МЭС состоит из *предприятий* магистральных электрических сетей (ПМЭС), предприятие, в свою очередь, может объединять большое количество *подстанций* (ПС). Поступающая на шины подстанций электрическая энергия распределяется между конечными потребителями.

Формализованная структура национальной электрической сети приведена на рис. 1, где используются следующие обозначения:

- $M_i, i=1, \dots, I$ , – это МЭС,  $I$  – количество МЭС;
- каждая МЭС  $M_i$  состоит из ПМЭС  $E_j, j=1, \dots, J_i$ , где  $J_i$  – количество ПМЭС в  $i$ -й МЭС;
- каждое ПМЭС  $E_j$  включает в себя подстанции  $s_k, k=1, \dots, K_{ij}$ , где  $K_{ij}$  – количество подстанций  $j$ -й ПМЭС в  $i$ -й МЭС.

При анализе данных энергетических обследований роль элементов множества  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  будут выполнять подстанции  $s_k$ .

Рассмотрим теперь состав *признаков*, характеризующих потери электрической энергии, с учетом которых будут формироваться ранжирования  $\Lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  подстанций  $s_k$ . *Структуру потерь электроэнергии* для анализа, нормирования и удобства расчета можно разделить на три категории [19]:

- технические потери, возникающие в процессе передачи электроэнергии в элементах электрической сети вследствие происходящих в них

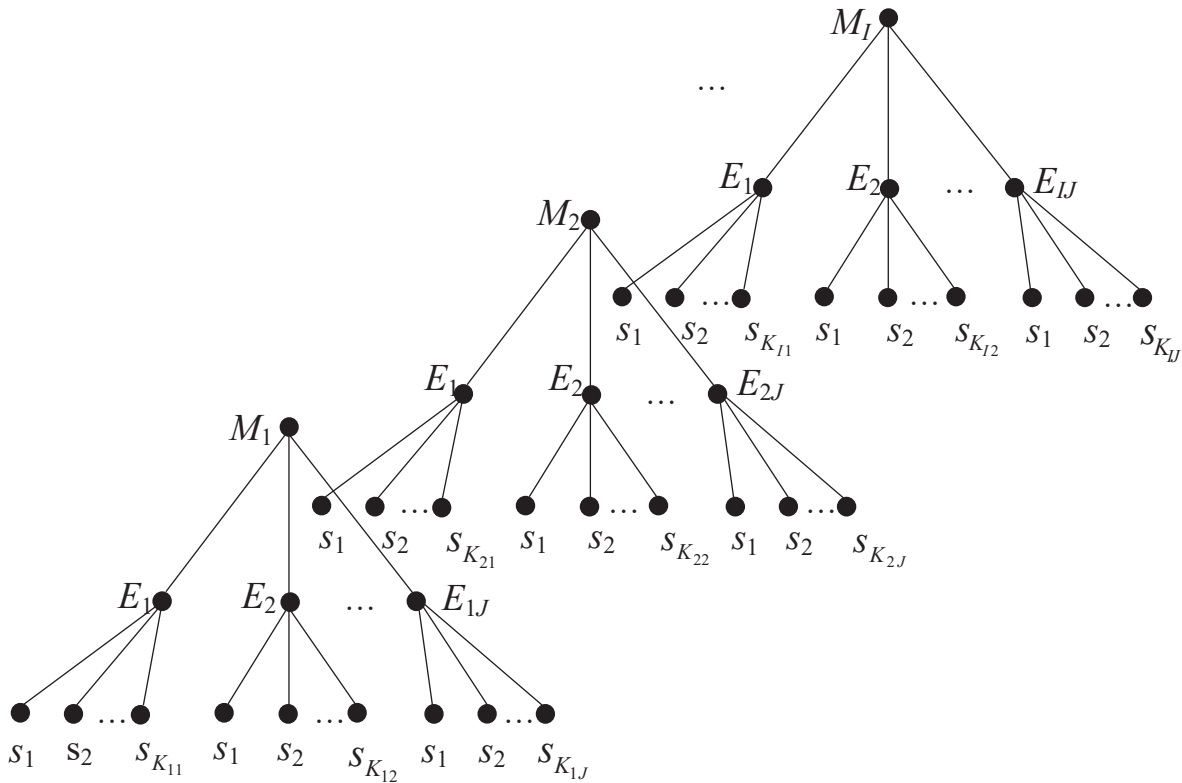


Рис. 1. Формализованная структура национальной электрической сети России

Fig. 1. Formalized structure of the Unified National Electric Network of Russia

физических процессов, состоят из потерь в распределительных линиях ( $\lambda_1$ ), потерь в силовых трансформаторах ( $\lambda_2$ ) и климатических потерь ( $\lambda_3$ );

- расход на собственные нужды подстанций – это электроэнергия, потребляемая вспомогательным оборудованием для поддержания процесса выработки, преобразования и распределения электрической энергии, а также расходующаяся для поддержания нормальных условий жизнедеятельности обслуживающего персонала подстанций; включает в себя расходы: на обогрев зданий и оборудования ( $\lambda_4$ ), на освещение ( $\lambda_5$ ), на электропитание вспомогательных устройств ( $\lambda_6$ ), на охлаждение трансформаторов ( $\lambda_7$ ), на прочие нужды ( $\lambda_8$ );
- коммерческая составляющая потеря – это потери электроэнергии, возникающие в связи с наличием погрешности при выполнении измерений, а также с другими факторами, вызывающими недоучет энергии ( $\lambda_9$ ).

Метод АПЭО предполагает выполнение приведенных ниже четырех основных этапов.

1. Формирование множества подстанций  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , структуру потерь электроэнергии которых необходимо проанализировать.
2. Построение профиля предпочтений  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ , состоящего из  $m$  ранжирований вида (1)  $n$  подстанций  $s_k$  по каждому из признаков  $\lambda_k, k = 1, \dots, m$ , структуры потерь по следующему правилу: пара подстанций  $a_i$  и  $a_j$  будет на-

ходиться в бинарном отношении  $a_i > a_j$  или  $a_i < a_j$ , или  $a_i \sim a_j$  по признаку  $\lambda_k$ , если соответствующие пары значений потерь  $v_i$  и  $v_j$  состоят в бинарном отношении  $v_i < v_j$  или  $v_i > v_j$ , или  $v_i = v_j$  по признаку  $\lambda_k$  соответственно. Формальная запись этого правила имеет следующий вид:

$$v_i \underset{\lambda_k}{\geq} v_j \Leftrightarrow a_i \underset{\lambda_k}{\gtrsim} a_j. \quad (4)$$

3. Нахождение для профиля  $\Lambda$  ранжирований консенсуса  $V = \{\beta_1, \dots, \beta_N\}$ , представляющих собой отношения строго порядка, по правилу Кемени.
4. Определение с помощью правила свертки (3) итогового ранжирования консенсуса  $\beta_{fin}$ , которое

#### Обработка данных реальных энергетических обследований

Исходные данные о потерях электроэнергии для применения метода АПЭО были взяты из отчета по работе «Проведение аналитического этапа энергетического обследования ПАО «ФСК ЕЭС» по договору № 464525 от 07.04.2017 г. [20]. Поскольку во многих случаях число подстанций  $n$  превышало верхнюю допустимую границу, равную 20 (см. первый раздел статьи), было произведено разбиение множеств подстанций на подмножества (кластеры) по признаку их пропускной способности, т. е. количество энергии, которое поступает на шины подстанции [19].

Для демонстрации возможностей метода АПЭО будем рассматривать фрагмент Единой Национальной электрической сети России – МЭС Сибири  $M_3$ , в которой проанализируем множество подстанций Красноярского ПМЭС  $E_3 = \{s_1, s_2, \dots, s_{28}\}$ .

Следует учитывать, что подстанции множества  $E_3$  характеризуются различной пропускной способностью (т. е. количеством энергии, отпускаемой на их шины), связанной с характеристиками используемых силовых трансформаторов. Обеспечение возможности корректного сравнения потерь электроэнергии на подстанциях с различной пропускной способностью требует разбиения множества  $E_3$  на кластеры. Будем относить к одному кластеру подстанции, которые отличаются друг от друга по пропускной способности не более чем в 2,5 раза. Таким образом, множество  $E_3$  было разбито на 7 кластеров, приведенных в табл. 1, т. е.

$$\begin{aligned}
 E_3 &= \{s_1, s_2, s_3\} \cup \{s_4, s_5, s_6\} \cup \{s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}\} \cup \\
 &\cup \{s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\} \cup \{s_{16}, s_{17}, s_{18}, s_{19}, s_{20}, s_{21}\} \cup \\
 &\cup \{s_{22}, s_{23}, s_{24}, s_{25}\} \cup \{s_{26}, s_{27}, s_{28}\} = \\
 &= A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6 \cup A_7 = \\
 &= \{a_1, a_2, a_3\} \cup \{a_1, a_2, a_3\} \cup \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\} \cup \\
 &\cup \{a_1, a_2, a_3, a_4\} \cup \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\} \cup \\
 &\cup \{a_1, a_2, a_3, a_4\} \cup \{a_1, a_2, a_3\}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Профили предпочтений формировались для каждого кластера  $A_1, A_2, \dots, A_7$ .

Значения  $\nu$  потерь электроэнергии по всем признакам  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_9$  для подстанций  $a$  всех кластеров сведены в табл. 2.

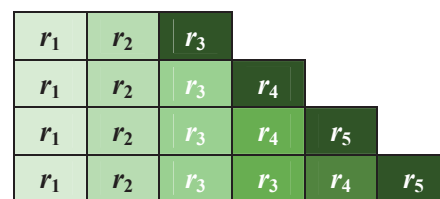
В табл. 3 представлены исходные профили предпочтений  $\Lambda$ , сформированные для семи кластеров из данных табл. 2 по правилу (4), в аналитической (символьной) и графической формах, приведенных соответственно в левой и правой частях таблицы, а также рассчитанные для этих профилей алгоритмом RECURSALL ранжирования консенсуса  $\beta_{\text{ин}}$ .

Аналитическое представление использует вертикальную форму задания ранжирований, в которой более предпочтительный элемент расположен ниже менее предпочтительного, толерантные элементы занимают одну и ту же позицию (например, элементы  $a_2$  и  $a_3$  в ранжировании  $\lambda_7$  кластера 1). К сожалению, аналитическое представление не обеспечивает достаточного уровня наглядности данных о предпочтениях.

Значительно большей наглядности можно достичь графическим представлением профилей предпочтения, если воспользоваться соответствием между определенной интенсивностью цвета и позицией  $r_i$  (рангом, см. раздел «Агрегирование предпочтений») элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_k$ . Поскольку числа элементов в профилях могут быть различными, необходимо иметь цветовую шкалу для всех вариантов значений  $n$ , обусловленных исходными анализируемыми данными. В нашем случае потребовалось иметь четыре цветовых шкалы при  $n=3, 4, 5$  и  $6$  (рис. 2). Приведенные на рис. 2 цветовые шкалы были использованы для формирования правой части табл. 3.

**Таблица 1.** Разбиение множества ПС  $E_3$  вида (5) на кластеры  
**Table 1.** Partition of the substations (S) set  $E_3$  of the form (5) into clusters

Кластер/Cluster	Пропускная способность ПС, тыс. кВт·ч Throughput of substation, 10 <sup>3</sup> kWh	Подстанция/Substation		
		Наименование/Name	$E_3$	A
1	5188,430 7334,755 12020,893	ТПК/ТРК	$s_1$	$a_1$
		Имбинская/Imbinskaya	$s_2$	$a_2$
		Рассвет/Rassvet	$s_3$	$a_3$
2	43290,338 85878,540 99228,260	Троицкая/Troitskaya	$s_4$	$a_1$
		Красная	$s_5$	$a_2$
		Сопка Бур-1/Bur-1	$s_6$	$a_3$
3	136978,540 179520,104 211623,787 295662,146 351775,435	Красноярская/Krasnoyarskaya	$s_7$	$a_1$
		Гориевский ГОК/Gorievskiy GOK	$s_8$	$a_2$
		Зеленая/Zelenaya	$s_9$	$a_3$
		Шарыповская/Sharypovskaya	$s_{10}$	$a_4$
		Кодинская ГПП/Kodinskaya GPP	$s_{11}$	$a_5$
4	483497,172 515533,162 614574,001 939575,208	Правобережная/Pravoberezhnaya	$s_{12}$	$a_1$
		Узловая/Uzlovaya	$s_{13}$	$a_2$
		Ужур/Uzhur	$s_{14}$	$a_3$
		Абалаковская/Abalakovskaya	$s_{15}$	$a_4$
5	1220315,140 1235329,424 1895453,760 1944056,319 2648691,818 2908147,770	Центр/Tsentr	$s_{16}$	$a_1$
		Заводская/Zavodskaya	$s_{17}$	$a_2$
		Раздолинская/Razdolinskaya	$s_{18}$	$a_3$
		Приангарская/Priangarskaya	$s_{19}$	$a_4$
		КИСК/KISK	$s_{20}$	$a_5$
		Новокрасноярская/Novokrasnoyarskaya	$s_{21}$	$a_6$
6	3795995,572 4408158,887 9162322,615 9929712,475	Дивногорская/Divnogorskaya	$s_{22}$	$a_1$
		Левобережная/Levoberezhnaya	$s_{23}$	$a_2$
		Октябрьская/Oktyabr'skaya	$s_{24}$	$a_3$
		Енисей/Enisey	$s_{25}$	$a_4$
7	10581581,904 12209039,553 17174478,970	Камала-1/Kamala-1	$s_{26}$	$a_1$
		Итатская/Itatskaya	$s_{27}$	$a_2$
		ЦРП-220/ZRP-220	$s_{28}$	$a_3$



**Рис. 2.** Цветовые шкалы для представления ранжирований (ранг  $r_i$  элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_k$  показан соответствующим цветом)

**Fig. 2.** Color scales for representation of rankings (rank  $r_i$  of element  $a_i$  in a ranking  $\lambda_k$  is shown by the bloom)

В табл. 4 приведены результаты вычислений ранжирований консенсуса алгоритмом RECURSALL для каждого из семи кластеров и продемонстрировано применение правила свертки (3). Как видно из табл. 4, свертку потребовалось проводить только для кластеров 4 и 5, т. к. в этих случаях количество оптимальных решений превышало единицу.

В результате анализа данных энергетического обследования множества подстанций Краснояр-

**Таблица 2.** Значения  $v$  потерь электроэнергии по 9 признакам для семи кластеров, тыс. кВт·ч

**Table 2.** Values  $v$  of electrical energy losses by nine attributes for seven clusters,  $10^3$  kWh

ПС/S	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
<i>Кластер 1/Cluster 1</i>									
$a_1$	532,57	354,10	367,43	196,93	32,48	52,40	307,20	16,10	3,60
$a_2$	575,63	336,73	400,21	853,97	7,53	70,30	131,14	15,50	4,21
$a_3$	446,86	221,56	321,30	149,50	10,91	70,30	190,72	15,50	2,43
<i>Кластер 2/Cluster 2</i>									
$a_1$	529,34	530,18	321,60	121,20	9,06	63,13	191,70	15,50	4,32
$a_2$	500,14	489,30	382,93	228,93	36,67	70,30	172,60	7,36	2,56
$a_3$	593,91	541,17	365,40	885,05	12,45	157,40	380,31	15,50	2,39
<i>Кластер 3/Cluster 3</i>									
$a_1$	631,18	352,03	298,51	988,64	50,11	237,82	574,40	28,72	3,88
$a_2$	418,05	135,12	356,12	500,60	10,30	114,40	361,40	18,11	2,25
$a_3$	525,06	240,00	330,33	411,42	11,62	44,77	420,00	7,10	3,62
$a_4$	735,11	982,21	591,26	1028,40	4,68	157,40	384,40	47,9	3,24
$a_5$	985,43	2038,00	675,13	857,38	16,82	140,76	594,20	48,90	2,11
<i>Кластер 4/Cluster 4</i>									
$a_1$	463,21	1044,32	350,21	1329,37	214,30	132,03	532,03	15,40	5,23
$a_2$	501,47	1932,47	298,75	1175,86	44,18	126,10	480,40	15,40	7,56
$a_3$	398,21	1228,45	300,24	1115,97	41,25	135,20	384,40	13,10	3,87
$a_4$	436,97	2089,88	366,54	2305,35	127,98	95,12	384,40	15,40	2,21
<i>Кластер 5/Cluster 5</i>									
$a_1$	652,21	1112,49	365,45	920,31	86,65	114,20	496,67	42,36	5,24
$a_2$	633,54	2409,04	413,99	1045,25	12,92	70,10	521,17	15,60	6,10
$a_3$	500,98	2216,59	457,31	2369,87	198,54	158,20	404,50	48,65	5,10
$a_4$	539,10	1353,45	506,04	2987,56	203,56	158,20	408,56	145,2	5,92
$a_5$	699,32	1987,32	477,64	980,54	89,75	158,20	500,52	103,65	4,41
$a_6$	706,31	2148,45	563,21	852,14	145,63	158,20	520,96	99,32	6,57
<i>Кластер 6/Cluster 6</i>									
$a_1$	658,32	2675,18	321,65	1754,23	32,54	70,16	408,76	18,40	8,18
$a_2$	500,39	2847,32	488,33	1547,66	87,52	132,80	751,20	29,80	7,10
$a_3$	577,99	2057,39	766,21	876,31	17,87	88,20	480,10	16,40	8,90
$a_4$	602,37	2478,66	658,04	2054,65	96,32	165,56	1449,60	43,10	7,44
<i>Кластер 7/Cluster 7</i>									
$a_1$	889,65	3565,15	704,25	1785,65	375,84	125,00	2085,02	47,02	7,40
$a_2$	997,32	3067,11	766,98	2698,32	175,36	132,80	1159,80	58,07	6,13
$a_3$	947,21	2997,22	632,14	1857,32	102,35	148,20	2013,25	35,50	8,15

ского ПМЭС  $E_3$  был получен список наиболее проблемных подстанций, которые требуют особого внимания и проведения корректирующих мероприятий для снижения потерь электроэнергии. К таким подстанциям относятся ТПК, Бур-1, Кодинская ГПП, Правобережная, Новокрасноярская, Енисей, Итатская. Заметим, что эти подстанции, выделенные наиболее темным цветом в графическом представлении (табл. 3), визуально легко различимы на фоне других подстанций, характеризующихся меньшими потерями электроэнергии. Ясно, что метод АПЭО позволяет формировать списки не только наилучших подстанций, но и имеющих любые одинаковые ранги  $r$  (позиции в ранжированиях консенсуса). Таким образом, графическое представление имеет дополнительные

преимущества при использовании метода АПЭО по сравнению с аналитическим представлением с точки зрения удобства интерпретации данных энергообследований и последующего принятия решений.

#### Заключение

Предложен основанный на агрегировании предпочтений метод анализа и визуализации данных энергетических обследований магистральных электрических сетей. Метод позволяет формализовать и решить проблему выявления источников экономически неоправданных затрат энергетических ресурсов и неоправданных потерь энергии, а также обеспечить сжатие больших объемов данных энергообследований без потери существенной информации.

**Таблица 3.** Результаты обработки данных энергетических обследований Красноярского ПМЭС и их визуализация

**Table 3.** Results of processing the energy audit data of Krasnoyarsk EBEG and their visualization

Аналитическое представление профиля Л Analytical representation of profile L											Графическое представление профиля L Graphical representation of profile L										
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{fin}$	A	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{fin}$	
Классер 1/Cluster 1																					
$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$										$a_3$	
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_2$										$a_2$	
$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_3$										$a_1$	
Классер 2/Cluster 2																					
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_1$										$a_2$	
$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$										$a_1$	
$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$										$a_3$	
Классер 3/Cluster 3																					
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_5$	$a_2$	$a_1$										$a_2$	
$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_4$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_2$										$a_3$	
$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_5$	$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_3$										$a_1$	
$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_1$	$a_5$	$a_4$	$a_1$	$a_4$	$a_3$	$a_4$	$a_1$										$a_4$	
$a_5$	$a_5$	$a_5$	$a_4$	$a_1$	$a_1$	$a_5$	$a_5$	$a_1$	$a_5$	$a_5$										$a_5$	
Классер 4/Cluster 4																					
$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_1$											$a_3$	
$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_4$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_2$										$a_2$	
$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_4$	$a_3$										$a_4$	
$a_2$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_2$	$a_1$	$a_4$										$a_1$	
Классер 5/Cluster 5																					
$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_6$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_5$	$a_1$	$a_1$										$a_1$	
$a_4$	$a_4$	$a_2$	$a_1$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_2$										$a_2$	
$a_2$	$a_5$	$a_3$	$a_5$	$a_5$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$										$a_3$	
$a_1$	$a_6$	$a_5$	$a_2$	$a_6$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_4$	$a_5$	$a_4$										$a_5$	
$a_5$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_5$	$a_6$	$a_5$	$a_2$	$a_4$	$a_5$										$a_4$	
$a_6$	$a_2$	$a_6$	$a_4$	$a_4$	$a_6$	$a_2$	$a_4$	$a_6$	$a_6$	$a_6$										$a_6$	
Классер 6/Cluster 6																					
$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_1$										$a_3$	
$a_3$	$a_4$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_2$										$a_1$	
$a_4$	$a_1$	$a_4$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$										$a_2$	
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_3$	$a_4$	$a_4$										$a_4$	
Классер 7/Cluster 7																					
$a_1$	$a_3$	$a_3$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_1$										$a_3$	
$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_2$										$a_1$	
$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_2$	$a_1$	$a_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$										$a_2$	

**Таблица 4.** Результаты вычислений ранжирований консенсуса алгоритмом RECURSALL для семи кластеров.

**Table 4.** Computing results of consensus rankings by the algorithm RECURSALL for seven clusters

Кластер Cluster	Множество B ранжирований консенсуса Set B of consensus rankings	Итоговое ранжирование консенсуса $\beta_{fin}$ Final ranking of consensus $\beta_{fin}$
1	$a_3 > a_2 > a_1$	$a_3 > a_2 > a_1$
2	$a_2 > a_1 > a_3$	$a_2 > a_1 > a_3$
3	$a_2 > a_3 > a_1 > a_4 > a_5$	$a_2 > a_3 > a_1 > a_4 > a_5$
4	$a_3 > a_2 > a_4 > a_1$ $a_3 > a_4 > a_2 > a_1$	$a_3 > a_2 > a_4 > a_1$
5	$a_1 > a_2 > a_3 > a_5 > a_4 > a_6$ $a_1 > a_2 > a_5 > a_3 > a_4 > a_6$	$a_1 > a_2 > a_3 > a_5 > a_4 > a_6$
6	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$	$a_3 > a_1 > a_2 > a_4$
7	$a_3 > a_1 > a_2$	$a_3 > a_1 > a_2$

Потери электрической энергии неизбежно возникают в процессе энергоснабжения потребителей, а их объем определяет эффективность работы энергосетей и в значительной мере оказывает влияние на тарифы. Учитывая постоянно возрастающую стоимость энергоресурсов, анализ потерь электроэнергии и их минимизация представляют собой одну из насущных задач как для ресурсоснабжающих организаций, так и для их потребителей. Описанный в статье подход может стать удобным перспективным инструментом анализа и выявления источников нерациональных потерь электроэнергии для ресурсоснабжающих организаций, их потребителей и организаций, занимающихся энергоаудитом и энергоконсалтингом.

*Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 18-19-00203, в части разработки метода агрегирования предпочтений, и Министерством образования и науки РФ, базовая часть госзадания «Наука», проект № 2.5760.2017/8.9 в части анализа данных реальных энергообследований.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation, 2013. The Coalition for Energy Savings, Brussels, Belgium. URL: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf> (дата обращения: 01.05.2018).
2. Energy Technology Perspectives 2017. International Energy Agency. URL: [http://www.iea.org/media/translations/eed\\_ru.pdf](http://www.iea.org/media/translations/eed_ru.pdf) (дата обращения: 25.04.2018).
3. Eyupoglu C., Aydi M.A. Energy efficiency in backbone networks // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2015. – V. 195. – P. 1966–1970.
4. Sait H.H. Energy Conversion and Management Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and

- humid area // Energy Conversion and Management. – 2013. – V. 66. – P. 143–152.
5. Energy audit model based on a performance evaluation system / R.P. Zanardo, J.C.M. Siluk, F. de Souza Savian, P.S. Schneider // Energy. – 2018. – V. 154. – P. 544–552.
6. Solution for detection non-technical losses in electricity grid: a review / J.L. Viegas, P.R. Esteves, R. Melicio, V.M.F. Mendes, S.M. Vieira // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 80. – P. 1256–1258.
7. Shayesteh E., Gayme D.F., Amelin M. System reduction techniques for storage allocation in large power system // International Journal of Electrical Power and Energy System. – 2018. – V. 95. – P. 108–117.

8. Constructing core backbone network based on survivability of power grid / F. Dong, D. Liu, J. Wu, L. Ke, Ch. Song, H. Wang, Z. Zhu // *Journal of Electrical Power and Energy System*. – 2016. – V. 67. – P. 161–167.
9. Thang L., Dong X. A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line // *International Journal of Electrical Power and Energy System*. – 2018. – V. 99. – P. 376–384.
10. Hess D., Wetzel D., Cao K.-K. Representing node-internal transmission and distribution grids in energy system models // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 119. – P. 874–890.
11. Saaty T.L., Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. – New York: Springer Science & Business Media, 2013. – 363 p.
12. Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // *Математические проблемы управления*. – 2011. – № 1. – С. 8–13.
13. Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. – М.: КНОРУС, 2013. – 192 с.
14. Methods of rating competitors for quality awards: tentative comparative analysis / V. Artemenko, P. Martyusheva, S.V. Muravyov, N. Znamenschikova // *Proc. of the 10<sup>th</sup> IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science*. – Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 2, 2004. – V. 2. – P. 491–496.
15. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical models in the social sciences*. – Cambridge: MIT Press, 1972. – 145 p.
16. Muravyov S.V. Rankings as ordinal scale measurement results // *Metrology and Measurement Systems*. – 2007. – V. 13. – P. 9–24.
17. Muravyov S.V. Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination // *Measurement*. – 2014. – V. 51. – P. 328–334.
18. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons // *Measurement*. – 2013. – V. 46. – P. 2927–2935.
19. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л. *Справочник по проектированию электрических сетей*. – М.: ЭНАС, 2012. – 370 с.
20. Федеральная Сетевая компания Единой энергетической системы. URL: <http://www.fsk-ees.ru/eng> (дата обращения 05.05.2018).

*Поступила 24.10.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Муравьев С.В.**, доктор технических наук, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Борисова М.А.**, ассистент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 519.81:621.311

## PREFERENCE AGGREGATION IN INTERPRETATION OF ENERGY SURVEY DATA

Sergey V. Muravyov<sup>1</sup>,  
muravyov@tpu.ru

Mariya A. Borisova<sup>1</sup>,  
marits@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact that systematic energy surveys of power networks to identify possible energy loss is the basis for energy saving and energy efficiency. Energy survey data processing is a work with large volume of unstructured data that is difficult to fully account.

**The main aim** of the paper is to solve the problem of energy survey data processing on the base of preference aggregation approach, which will enable efficient data compression preventing the loss of useful information and provide clear visualization of energy audit results.

The Backbone Electric Grids (BEGs), being a part of the Unified National Electric Network of Russia are considered as the object of the research. The Backbone Electric Grids, in their turn, consist of the Enterprises of Backbone Electric Grids, each of which may unite a large number of substations. Annual energy survey data of Russian Backbone Electric Grids are included in the database of the Federal Grid Company of Unified Energy System.

**Methods.** The authors propose the method, based on the preference aggregation, which allow obtaining and representing a great amount of data of instrumental survey of substation energy losses in a form of a compact integral estimate in the ordinal scale convenient for rapid decision making and visualization. Application of the proposed method to processing energy survey data of real backbone electric grids of Russia is discussed in the paper.

**Results.** The method makes it possible to identify sources of economically inefficient expenditure of energy resources and unjustified energy losses, and also to provide compression of large volumes of energy survey data without diminution of essential information. The proposed method can be an appropriate and promising tool for organizations engaged in energy consulting.

**Key words:**

Energy audit, losses of electrical energy, preferences aggregation, consensus ranking, Kemeny rule.

The research was supported by the Russian science fund, project no. 18–19–00203, in development of the preference aggregation method, and by the Ministry of Education and science of the RF, the basic part of the state task «Nauka», project no. 2.5760.2017/8.9 in analyzing the data of real energy survey.

## REFERENCES

1. EU Energy Efficiency Directive (2012/27/EU) Guidebook for Strong Implementation, 2013. The Coalition for Energy Savings, Brussels, Belgium. Available at: <http://eedguidebook.energycoalition.eu/images/PDF/EED.pdf> (accessed 1 May 2018).
2. Energy Technology Perspectives 2017. International Energy Agency. Available at: [http://www.iea.org/media/translations/eer\\_ru.pdf](http://www.iea.org/media/translations/eer_ru.pdf) (accessed 25 April 2018).
3. Eyupoglu C., Aydi M.A. Energy Efficiency in Backbone Networks. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2015, vol. 195, pp. 1966–1970.
4. Sait H.H. Energy Conversion and Management Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid area. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 66, pp. 143–152.
5. Zanardo R.P., Siluk J.C.M., de Souza Savian F., Schneider P.S. Energy audit model based on a performance evaluation system. *Energy*, 2018, vol. 154, pp. 544–552.
6. Viegas J.L., Esteves P.R., Melicio R., Mendes V.M.F., Vieira S.M. Solution for detection non-technical losses in electricity grid: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 80, pp. 1256–1258.
7. Shayesteh E., Gayme D.F., Amelin M. System reduction techniques for storage allocation in large power system. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2018, vol. 95, pp. 108–117.
8. Dong F., Liu D., Wu J., Ke L., Song Ch., Wang H., Zhu Z. Constructing core backbone network based on survivability of power grid. *Journal of Electrical Power and Energy System*, 2016, vol. 67, pp. 161–167.
9. Thang L., Dong X. A travelling wave differential protection scheme for half-wavelength transmission line. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2018, vol. 99, pp. 376–384.
10. Hess D., Wetzel D., Cao K.-K. Representing node-internal transmission and distribution grids in energy system models. *Renewable Energy*, 2015, vol. 119, pp. 874–890.
11. Saaty T.L., Vargas L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. New York, Springer Science & Business Media, 2013. 363 p.
12. Podinovskiy V.V., Podinovskaya O.V. On incorrectness of the analytic hierarchy process. *Mathematical control problems*, 2011, no. 1, pp. 8–13. In Rus.
13. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: problems, principles, methodology]. Moscow, KNORUS Publ., 2013. 192 p.
14. Artemenko V., Martuyusheva P., Muravyov S.V., Znamenshchikova N. Methods of rating competitors for quality awards: tentative comparative analysis. *Proc. of the 10<sup>th</sup> IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science*. Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 2, 2004. Vol. 2, pp. 491–496.



15. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical Models in the Social Sciences*. Cambridge, MIT Press, 1972. 145 p.
16. Muravyov S.V. Rankings as ordinal scale measurement results. *Metrology and Measurement Systems*, 2007, vol. 13, pp. 9–24.
17. Muravyov S.V. Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination. *Measurement*, 2014, vol. 51, pp. 328–334.
18. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons. *Measurement*, 2013, vol. 46, pp. 2927–2935.
19. Karapetyan I.G., Faibisovich D.L. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Reference book for design of electrical networks]. Moscow, ENAS Publ., 2012. 370 p.
20. *Federalnaya Setevaya kompaniya Edinoy energeticheskoy sistemy* [Federal Grid Company of Unified Energy System]. Available at: <http://www.fsk-ees.ru/eng> (accessed 5 May 2018).

*Received: 24 October 2018.*

#### **Information about the authors**

**Sergey V. Muravyov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Mariya A. Borisova**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.