

# Анализ и визуализация данных энергоаудита методом агрегирования предпочтений

С.В. Муравьев, М.А. Борисова  
muravyov@tpu.ru | marits@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

*Систематическое проведение энергетических обследований электрических сетей с целью выявления потерь электроэнергии – основа энергосбережения и энергоэффективности. В статье предложен основанный на агрегировании предпочтений метод, позволяющий представить большой объем данных инструментальных обследований расхода энергии на собственные нужды подстанциями 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.*

**Ключевые слова:** агрегирование, энергосбережение, обработка данных, визуализация, энергоаудит.

## 1. Введение

Основной задачей проведения энергетических обследований является расчет потерь электроэнергии на электрических подстанциях. Международные рекомендации в области энергетики требуют, чтобы в процессе передачи электроэнергии в электрических сетях потери не превышали 4 % [9], однако фактические потери магистральных электрических сетей, как правило, составляют не менее 10 %. Значимой составляющей фактических потерь является *расход электрическими подстанциями энергии на собственные нужды* [1].

Традиционно обработка результатов энергетических обследований представляет собой работу с большим объемом неструктурированных данных [3], которые плохо поддаются полному учету. В таких случаях традиционно используются методы многокритериального выбора, такие, например, как метод обобщенного показателя качества или метод анализа иерархий [7,12], которые реализуют сравнение анализируемых объектов на основе взвешенной суммы частных показателей. Эти методы не поддаются серьезной аксиоматизации, и могут приводить к ошибочным решениям [8,10]. Этим недостатком удается избежать при применении агрегирования предпочтений [2], 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.

## 2. Агрегирование предпочтений

Пусть задано множество  $m$  ранжирований  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$   $n$  объектов (альтернатив) из множества  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ . Каждое ранжирование имеет вид цепочки и задает отношение предпочтения  $\lambda_k = (a_1 > a_2 \dots > a_n \sim a_1 > \dots \sim a_n)$  на множестве  $A$ . Отношение предпочтения  $\lambda$  является объединением двух отношений: отношения строгого предпочтения  $\rho$ , т. е.  $a_i > a_j$ , и отношения толерантности  $\tau$ , т. е.  $a_i \sim a_j$ , т. е.  $\lambda = \rho \cup \tau$ . Множество ранжирований  $\Lambda$  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* [4], состоящее в нахождении такого линейного 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 линейных порядков (перестановок) альтернатив.

Правило Кемени допускает существование неединственного ранжирования консенсуса: число  $N$  найденных по этому правилу оптимальных решений может достигать значений более  $10^7$  даже для небольших  $m = 4$  и  $n = 15$  [6]. Для свертки множества оптимальных решений  $V = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$  к единственному итоговому ранжированию  $\beta_n$  будем использовать следующее условие: если число пар  $a_i > a_j$  равно числу пар  $a_i < a_j$  во всех ранжированиях консенсуса, то  $a_i \sim a_j$  в итоговом ранжировании  $\beta_n$ ; в противном случае в  $\beta_n$  включается та из пар  $a_i > a_j$  и  $a_i < a_j$ , которая встречается среди оптимальных решений большее число раз.

Для нахождения ранжирования Кемени будем использовать рекурсивный алгоритм собственной разработки RECURSALL, реализующий метод ветвей и границ, позволяющий находить все возможные ранжирования Кемени для заданного исходного профиля предпочтений [5].

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 [5]. Заметим, что при подходящей для практического применения размерности задачи  $n \leq 20$  алгоритм RECURSALL позволяет находить все точные решения за приемлемое время – порядка нескольких миллисекунд. В ситуациях, где  $n > 20$ , следует прибегать к разбиению множества  $A$  на непересекающиеся

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

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. Отношения консенсуса  $\beta_i$ , найденные на множестве  $A_i$ , войдут в состав профиля вышестоящего уровня иерархии, для которого также может быть найдено отношение консенсуса. Процесс продолжается до достижения наивысшего уровня иерархии.

### 3. Обработка данных реальных энергетических обследований

Правило Кемени и алгоритм RECURSALL были положены в основу метода анализа данных энергетических обследований магистральных электрических сетей (МЭС) России с помощью агрегирования предпочтений. Единая национальная электрическая сеть России включает в себя восемь МЭС, которые в свою очередь состоят из предприятий магистральных электрических сетей (ПМЭС), каждое из которых объединяет большое количество подстанций (ПС).

Исходные данные для метода содержались в обширных таблицах значений *нормативных расходов на собственные нужды (НРСН) подстанций* [11]. Данные были получены в ходе проведения энергетического обследования МЭС России и предоставлены ПАО «ФСК ЕЭС». Структура НРПСН содержит 9 основных составляющих: обогрев оборудования ( $\lambda_1$ ), освещение зданий ( $\lambda_2$ ), освещение территории ( $\lambda_3$ ), охлаждение трансформаторов ( $\lambda_4$ ), обогрев имеющегося оборудования ( $\lambda_5$ ), зарядные и подзарядные устройства ( $\lambda_6$ ), аппаратура связи и телемеханики ( $\lambda_7$ ), вентиляция и кондиционирование зданий ( $\lambda_8$ ) и прочие расходы ( $\lambda_9$ ).

Поскольку во многих случаях число подстанций  $n$  превышает верхнюю допустимую границу, равную 20 (см. раздел 2), нами была произведена разбиение множеств подстанций на подмножества (кластеры) по признаку их близкого географического расположения. Это было оправдано необходимостью анализа потребления ресурсов подстанциями, функционирующими в подобных климатических условиях.

Метод состоит из следующих основных этапов:

- 1) формирование множества подстанций  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , нормативное потребление энергии на собственные нужды которых необходимо проанализировать;
- 2) построение профиля предпочтений  $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_m\}$ , состоящего из  $m$  ранжирований  $n$  подстанций по каждой из составляющих (признаку) НРСН; пара подстанций  $a_i$  и  $a_j$  будет находиться 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 НРСН  $v_i$  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;
- 3) нахождение для профиля  $\Lambda$  ранжирований консенсуса по правилу Кемени  $B = \{\beta_1, \dots, \beta_n\}$ ;
- 4) определение с помощью свертки (см. раздел 2) итогового ранжирования консенсуса  $\beta_{fin}$ .

Для того, чтобы продемонстрировать применение предложенного метода на реальных данных, рассмотрим множество подстанций, расположенных возле г. Арзамас: Арзамасская ( $a_1$ ), Бобыльская ( $a_2$ ), Лукьяновская ( $a_3$ ) и Луч 500 ( $a_4$ ). Это множество подстанций относится к ПМЭС «Нижегородское» наряду с другими ареалами, расположенными вокруг населенных пунктов Нижний Новгород, Порецкое и Саранск. Близ городов Арзамас и Саранск расположены по 4 подстанции, близ Нижнего

Новгорода – 11 подстанций, около Порецкого – 5 подстанций. Значения  $v$  НРСН по всем признакам четырех подстанций в ареале г. Арзамас приведены в таблице 1.

Таблица 1. НРСН четырех подстанций в ареале г. Арзамас, тыс. кВт·ч.

A	Профиль $\Lambda$								
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$
$a_1$	449,3	9,7	95,9	1689,2	777,6	132,8	52,5	3,3	4,2
$a_2$	351,1	8,2	10,0	137,4	104,5	44,2	106,2	2,7	4,4
$a_3$	20,5	5,5	6,0	225,2	26,1	44,2	0	14,1	20,9
$a_4$	915,5	21,2	24,0	1159,8	370,8	132,8	52,5	65,3	329,8

В таблицах 2 и 3 представлены исходные профили предпочтений  $\Lambda$ , сформированные для подстанций расположенных близ г. Арзамас из данных таблицы 1 методом агрегирования предпочтений, в аналитической (символьной) и графической формах, приведенных соответственно в левой и правой частях таблицы, а также рассчитанные для этих профилей алгоритмом RECURSALL ранжирования консенсуса  $\beta_{fin}$  с учетом правила свертки (см. раздел 2).

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  $\lambda_6$ . К сожалению, аналитическое представление не обеспечивает достаточного уровня наглядности данных о предпочтениях.

Таблица 2. Аналитическое представление результатов обработки данных энергетического обследования подстанций близ г. Арзамас

Профиль $\Lambda$									
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{fin}$
$a_3$	$a_3$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_3$
$a_2$	$a_2$	$a_2$	$a_3$	$a_2$	$a_3$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_2$
$a_1$	$a_1$	$a_4$	$a_4$	$a_4$	$a_3$	$a_4$	$a_3$	$a_3$	$a_1$
$a_4$	$a_4$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_1$	$a_2$	$a_4$	$a_4$	$a_4$

Значительно большей наглядности можно достичь графическим представлением профилей предпочтения, если воспользоваться соответствием между определенной интенсивностью цвета и позицией  $r_i$  (рангом) элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_j$  показана соответствующим цветом. Поскольку числа элементов в профилях могут быть различными, необходимо иметь цветовую шкалу для всех вариантов значений  $n$ , обусловленных исходными анализируемыми данными. На рис. 1 приведена цветовая шкала, которая была использована для визуализации результатов обработки данных энергетического обследования подстанций близ г. Арзамас (таблица 3).

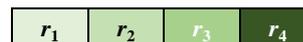


Рис. 1. Цветовая шкала для представления ранжирований (ранг  $r_i$  элемента  $a_i$  в ранжировании  $\lambda_j$  показан соответствующим цветом)

Результатом применения метода агрегирования предпочтений является выявление двух подстанций  $a_1$  (Арзамасская) и  $a_4$  (Луч 500) в ареале г. Арзамас, для которых необходимо провести мероприятия по снижению НРСН.

Таблица 3. Графическое представление результатов обработки данных энергетического обследования подстанций близ г. Арзамас

Профиль $\Lambda$									
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\beta_{\text{фин}}$
									$a_3$
									$a_2$
									$a_1$
									$a_4$

#### 4. Заключение

В статье предложен основанный на агрегировании предпочтений метод анализа и визуализации данных энергетических обследований магистральных электрических сетей. 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.

#### 5. Благодарности

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.

#### 6. Литература

- [1] Abeysinghe S., Wu J., Sooriyabandara M., Abeyssekera M., Xu T., Wang Ch. Topological properties of medium voltage electricity distribution networks // *Applied Energy*. – 2018. – V. 210. – P. 1101-1112.
- [2] Artemenko V., Martyusheva P., Muravyov S.V., Znamenshikova N. Methods of rating competitors for quality awards: tentative comparative analysis // *Proceedings of the 10th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science (June 30-July 2, 2004, Saint-Petersburg, Russia)*. – V. 2. – P. 491-496.

- [3] Eyupoglu C., Aydi M.A. Energy efficiency in backbone networks // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2015. – V. 195. – P. 1966–1970.
- [4] Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical models in the social sciences*. – Cambridge: MIT Press. – 1972. – P. 145.
- [5] Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons // *Measurement*. – 2013. – V. 46. – P. 2927-2935.
- [6] Muravyov S.V. Dealing with chaotic results of Kemeny ranking determination *Measurement*. – 2014. – V. 51. – P. 328-334.
- [7] 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. – P. 363.
- [8] Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. – М.: КНОРУС, 2013. – 192 с.
- [9] Перспективы энергетических технологий Международного энергетического агентства <[http://www.iea.org/media/translations/eer\\_ru.pdf](http://www.iea.org/media/translations/eer_ru.pdf)> (последнее обращение 25.02.18)
- [10] Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // *Математические проблемы управления*, 2011. – 8 - 13 с.
- [11] Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической Системы <<http://www.fsk-ees.ru/eng>> (последнее обращение 05.02.18)
- [12] Хвастунов Р.М., Ягелло О.И., Корнеева В.М., Поликарпов М.П. *Экспертные оценки в квалиметрии машиностроения*. – М.: Технонефтегаз, 2002. – 140 с.

#### Об авторах

Муравьев Сергей Васильевич, д.т.н., профессор отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. Его e-mail [muravyov@tpu.ru](mailto:muravyov@tpu.ru).

Борисова Мария Андреевна, аспирант отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники Томского политехнического университета. Ее e-mail [marits@tpu.ru](mailto:marits@tpu.ru).