

УДК 519.6+661.331:621.311

В.Г. Кузнецов, В.И. Шинкаренко

Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий в задачах планирования энергосберегающих мероприятий системы электроснабжения железнодорожного транспорта

Аннотация. В соответствии с особенностями иерархии проблемы энергосбережения решается задача ранжирования мероприятий энергосбережения и объектов их внедрения. Предложен усовершенствованный метод анализа иерархий, который обеспечивает согласованность матрицы предпочтений на всех этапах ранжирования.

Ключевые слова: энергосбережение, метод анализа иерархий, экспертная оценка, ранжирование альтернатив, сортировка.

Введение

Проблемой энергосбережения на железнодорожном транспорте занимались и занимаются все производственные подразделения, причастные к движению, привлекается весь научный потенциал отраслевых учебных и исследовательских институтов [1, 2].

Однако теоретическая база по выбору мероприятий по энергосбережению на железнодорожном транспорте отсутствует. Выбор энергоэффективных технологий производится без системного подхода, на спонтанно-интуитивной основе.

Разработка и внедрение новых, поддержка не утративших актуальности ранее известных мероприятий энергосбережения требует современных, научно обоснованных подходов к планированию и оперативному управлению. В данной работе предлагается новый подход к решению проблем энергосбережения, в частности, в системе электроснабжения тяги поездов постоянного тока.

Применение метода анализа иерархий (МАИ) при планировании мероприятий энергосбережения позволит снизить субъективную составляющую, повысить эффективность планирование и как следствие общий эффект экономии электроэнергии.

Постановка задачи

Разработка плана по энергосбережению предусматривает решение задач учета энергосберегающих мероприятий, их ранжирования и отбора в соответст-

вии с имеющимися возможностями, ранжирования и выбора объектов внедрения, выделение технологических составляющих мероприятий, установление сроков, исполнителей, методов и средств контроля эффективности применения.

Ключевыми процессами планирования является ранжирование мероприятий по энергосбережению и объектов их внедрения, что и является задачей данной работы.

Особенности иерархии проблемы энергосбережения

Анализ проблемы позволил выделить особенности, которые необходимо учесть при построении иерархии проблемы.

Структурно-организационная модель планирования, управления и выполнения мероприятий имеет три уровня: Укрзалізниця, службы дороги и дистанции электроснабжения.

На уровне дистанции электроснабжения принимаются решения о:

- схеме питания контактной сети;
- установке вольтодобавочных устройств;
- модернизации контактной сети;
- переключении на параллельную работу силовых трансформаторов и преобразователей;
- регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций;
- замене преобразовательных и силовых трансформаторов выпрямителей и др.

На этом уровне все вопросы замены оборудования решаются по согласованию с вышестоящими инстанциями, а вопросы регулирования режимов решаются энергодиспетчером с использованием устройств телемеханики.

На уровне службы электроснабжения принимаются решения о:

- переводе тяги поездов на высший уровень напряжения;
- выборе метода расчётов за электроэнергию (одноставочный тариф, дифференцированный тариф или оптовые цены) и др.

На уровне главка электроснабжения осуществляется формирование технической политики хозяйства электрификации:

- распределение оборудования по дистанциям (в соответствии с заявками);
- контроль норм расхода электроэнергии;
- контроль эффективности мероприятий по энергосбережению и др.

Отметим, что количество альтернатив достаточно большое и значительно превышает возможности стандартного МАИ.

При планировании мероприятий по энергосбережению необходимо учитывать следующие факторы: степень готовности к исполнению; затратность; вероятность достижения цели; ожидаемый экономический эффект; осуществимость или технические возможности внедрения.

Обеспечение согласованности матриц предпочтения

МАИ [3] предназначен для повышения объективности и обоснованности принятия решений в задачах выбора или ранжирования альтернатив.

Наиболее сложным элементом метода является составление экспертом (экспертами) в предметной области матрицы предпочтений – определение степени приоритетности в каждой паре имеющихся альтернатив. Сложность заключается в том, что отсутствие у эксперта развитого логического мышления, нечеткость информации об альтернативах часто приводят к несогласованности экспертных оценок.

Добиться абсолютной согласованности экспертных оценок с одной стороны практически не возможно, а с другой – в этом нет необходимости. Саати [3] предложен метод определения отношения согласованности (ОС) матрицы предпочтений, который является количественной оценкой непротиворечивости экспертных сравнений.

Опыт показывает, что добиться допустимой согласованности сравнений (по ОС) также достаточно непросто. Выполненные вычислительные эксперименты тому подтверждение. При трех альтернативах количество возможных матриц предпочтения со шкалой, предложенной Саати – 4 913 (17^3) и только 1 116 (23%) из них являются согласованными, при четырех альтернативах – 24 137 569 (17^6) и 749 886 (3%) соответственно.

Если отношение согласованности превышает допустимые пределы, эксперт по интуитивным представлениям может попытаться изменить оценки для повышения согласованности. Одним из выходов [4] является построение абсолютно согласованной матрицы, задавая только базовые оценки, вычисляя остальные согласно свойству транзитивности. Однако проблема согласованности оценок эксперта при этом не решается, а просто камуфлируется.

Нами предлагается методика построения матрица предпочтений, которая на каждом шаге инвариантно обеспечивает согласованность по допустимому уровню отношения согласованности – инвариантно-согласованный МАИ (ИС МАИ).

Работа эксперта должна выполняться в программной среде, обеспечивающей возможность одновременного доступа к графическому элементу управления и двум представлениям матрицы предпочтений.

На рис. 1 приведен элемент управления для трех альтернатив.

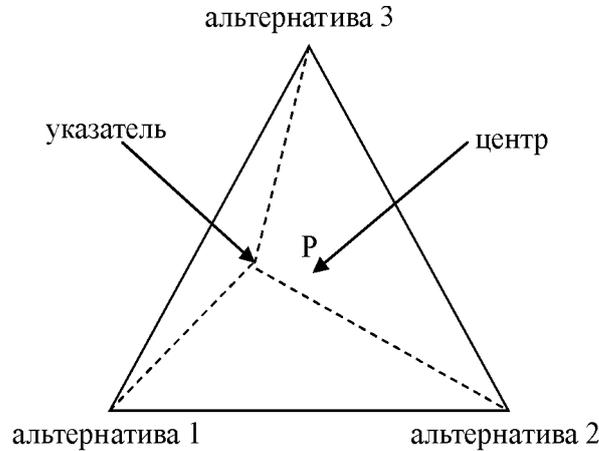


Рисунок 1 – Элементы интерфейса пользователя для сравнения альтернатив

Для работы с представленным элементом управления эксперту необходимо знать единственное правило: чем относительно положение указателя ближе к некоторой вершине, тем соответствующая альтернатива предпочтительнее. Допустимые перемещения соответствуют согласованным матрицам предпочтения. Например, допустимые перемещения указателя из исходного расположения вершин показаны на рис. 2.

Согласно заданным пользователям соотношениям формируются матрицы предпочтений в числовом (табл. 1) и семантическом представлении (табл. 2).



Рисунок 2 – Отметки соответствующие согласованной матрице предпочтений

Таблица 1

Матрица предпочтений в числовом представлении

Альтернативы	1	2	3
1	X	6	8
2	1/6	X	1/2
3	1/8	2	X

Матрица предпочтений в семантическом представлении

	Готовность	Затратность	Эконом. эффект
Готовность	X	Превосходство между сильным и значительным	Превосходство между значительным и очень сильным
Затратность	X	X	Уступает меньше, чем умеренно
Эконом. эффект	X	X	X

Каждому возможному заполнению матрицы предпочтений соответствует допустимая точка на элементе управления, в которой минимизируется несогласованность предпочтений. Для приведенного элемента управления (рис. 1) функция соответствия точки матрице предпочтений:

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{s_{ij} - r_i}{s_{ij} - r_j} \right)^2,$$

где s_{ij} – расстояние между вершинами, соответствующих альтернативам i и j , r_i – расстояние между вершиной соответствующей альтернативе i и указательной точкой.

Алгоритм ранжирования мероприятий

Ввиду того, что мероприятий энергосбережения достаточно много, а МАИ теоретически ограничено десятью альтернативами, а практически ранжирование 5-6 альтернатив может быть достаточно сложным, предлагается следующий алгоритм сортировки (ранжирования).

Особенность сортировки альтернатив по убыванию весов заключается в том, что веса альтернатив не обладают свойством транзитивности, они неизвестны, можно лишь установить их соотношения, которые в свою очередь изначально неизвестны и имеют субъективную составляющую.

Представим укрупненный алгоритм на псевдокоде:

выполнить:

- группировку альтернатив по 3-4 в группе, последовательно выбирая элементы исходного массива (формулы 1, 2) и ранжирование ИС МАИ в каждой группе (4-6, 13);
- повторно группировку альтернатив по 3-4 в группе таким образом, чтобы не было одинаковых групп в первой и повторной группировках (1, 3) и ранжирование ИС МАИ в каждой группе (4-6, 13);

цикл пока изменяется местоположение альтернатив *выполнить:*

- группировку альтернатив по 4-6 в группе (1, 2);
- сортировку альтернативы в группах согласно весам, для чего:
 - построить матрицу предпочтений (4, 5), дополнив недостающие элементы матрицы
 - *если* известных транзитивных отношений больше либо равно двух
 - *то* усреднением оценки в предположении выполнения свойства транзитивности (7)
 - *иначе* запросив у эксперта ИС МАИ подматрицы размерностью три (8, 9);
 - *если* матрица предпочтений не согласована
 - *то* преобразовать к ближайшей согласованной, незначительно изменяя дополненные элементы (10);
- вычисление весов альтернатив согласно МАИ (11) и сортировку (12, 13);
- повторно группировку альтернатив по 5-6 в группе, выбирая элементы в исходном массиве со сдвигом на три элемента (1, 3) и сортировку альтернативы в группе как описано ранее (4-13).

Уточним алгоритм формальными средствами. Будем обозначать ${}^k A_i$ – i -й элемент массива ${}^k \mathbf{A}$ на k -м шаге алгоритма, размерность массива ${}^k \mathbf{A}$ – n ; a_{ij} – элементы парных сравнений. Элементы a_{ij} являются экспертными оценками и вначале $\forall a_{ij} = 0$.

$$\text{Группировка альтернатив } {}^k \mathbf{B}_i = [{}^k B_j, {}^k B_{j+1}, \dots, {}^k B_{j+\frac{1}{r}n}], \quad (1)$$

где ${}^k B_j$ – j -я альтернатива r -й группы на k -м шаге алгоритма, чередуясь с МАИ, выполняется следующим образом:

$$k = 4I + 1 \quad (I = 0, 1, 2, \dots): \quad \sum_{r=1}^k n = n, \quad {}^k B_i = {}^{k-1} A_j, \quad j = i + \frac{k}{r} m, \quad \frac{k}{r} m = \sum_{i=0}^{r-1} \frac{k}{i} n; \quad (2)$$

$$k = 4I + 3: \quad {}^k N = {}^{k-1} N - 1, \quad \frac{k}{r} n = \frac{k-2}{r} n, \quad {}^k B_i = {}^{k-1} A_j, \quad \text{где } j = i + \frac{2}{r} m + \lceil \frac{k-1}{1} n / 2 \rceil, \quad (3)$$

где ${}^k N$ – количество групп на k -м шаге, $\frac{k}{0} n = 0$. Количество альтернатив в группах $\frac{k}{r} n$ при $k = 1$ выбирается равным 3...4 (предпочтение трем), при $k > 4$ – 4...6 (предпочтение шести).

Для каждой ${}^k_r\mathbf{B}$ строится матрицы предпочтений $[{}^k_r b_{ij}]$ и признаков $[{}^k_r u_{ij}]$

$${}^k_r b_{ij} = a_{pq}, \quad p, q : ({}^k_r B_i = {}^{k-1}A_p \& {}^k_r B_j = {}^{k-1}A_q) \text{ и } {}^k_r u_{ij} = 0. \quad (4)$$

Матрица предпочтений $[{}^k_r b_{ij}]$ для группы ${}^k_r\mathbf{B}$ в интерактивном режиме определяется экспертом на основе ИС МАИ

$${}^k_r b_{ij} = \mu_p \quad \bar{\mu} = [1/9, 1/8, \dots, 1, 2, \dots, 9]. \quad (5)$$

Матрица $[a_{ij}]$ дополняется элементами полученными от эксперта:

$$a_{ij} = {}^k_r b_{pq} \text{ при } {}^0 A_i = {}^k_r B_p \& {}^0 A_j = {}^k_r B_q. \quad (6)$$

При $k > 4$ выполняется дополнение матрицы $[{}^k_r b_{ij}]$ следующим образом: если ${}^k_r b_{ij} = 0$ и $\exists \nu$ таких t_d , что ${}^k_r b_{it_d} > 0 \& {}^k_r b_{t_d j} > 0$, то

$${}^k_r b_{ij} = 1/\nu (\sum_{l=1}^{\nu} ({}^k_r b_{it_d} / {}^k_r b_{t_d j})) \text{ и } {}^k_r u_{ij} = 1. \quad (7)$$

Если после дополнения в матрице $[{}^k_r b_{ij}]$ остаются нулевые элементы, они определяются на основе ИС МАИ: формируется группа альтернатив ${}^k_r \tilde{\mathbf{B}} = [{}^k_r \tilde{B}_1, {}^k_r \tilde{B}_2, {}^k_r \tilde{B}_3]$ так, что для $\forall {}^k_r b_{ij} = 0 \exists {}^k_r \tilde{B}_p = {}^k_r B_i$. Матрица предпочтений $[{}^k_r \tilde{b}_{ij}]$ для группы ${}^k_r \tilde{\mathbf{B}}$ в интерактивном режиме определяется экспертом на основе ИС МАИ с ограничениями, согласно данным ранее оценкам эксперта ${}^k_r \tilde{b}_{ij} = \mu_p$.

Матрица предпочтений $[a_{ij}]$ дополняется элементами полученными от эксперта: $a_{ij} = {}^k_r \tilde{b}_{pq}$ при ${}^0 A_i = {}^k_r \tilde{B}_p \& {}^0 A_j = {}^k_r \tilde{B}_q$.

Если в матрице $[{}^k_r b_{ij}]$ нет нулевых элементов, но она не согласована, выполняется ее согласование. Элементы ${}^k_r b_{ij}$ для которых ${}^k_r u_{ij} = 1$ изменяются ${}^k_r b_{ij} = {}^k_r b_{ij} \pm {}^k_r \delta_{ij} = (\mu_p / {}^k_r b_{ij} + \mu_{p \pm q})$,

где p такое, что $\mu_p = {}^k_r b_{ij}$; ${}^k_r \delta_{ij}$ определяются полным перебором из условия минимума отношения согласованности при $q \leq 1$. Если минимум больше 0,1 поиск ${}^k_r \delta_{ij}$ продолжается при $q \leq 2, q \leq 3$ и т.д. до согласования матрицы $\{ {}^k_r b_{ij} \}$.

Согласно МАИ выполняется ранжирование альтернатив в группе. Для этого и стандартным образом определяются веса:

$${}^k_r w_i = \frac{1}{{}^k_r n} \sum_{i=1}^{k_r n} ({}^k_r b_{ij} / \sum_{j=1}^{k_r n} {}^k_r b_{ij}). \quad (11)$$

Выполняется сортировка элементов в группах:

$$\forall_r^2 B_i \exists_r^1 B_j : {}^1_r w_j \leq {}^1_r w_i \leq {}^1_r w_k \text{ при } j < i < k \text{ и } 1 \leq i, j, k \leq {}^2_r n, \forall_r^2 n = {}^1_r n. \quad (12)$$

Соответственно переставляются элементы и в массиве альтернатив:

$${}^k A_i = {}^{k-1} A_i, \text{ при } k = 1, 3, 5, \dots; \quad {}^k A_i = {}^{k-1} B_q, \quad (13)$$

где p и q определяются из соотношений
$$i - \frac{k}{p} m = \min_s (i - \frac{k}{s} m), \quad q = i - \frac{k}{p} m,$$

а s удовлетворяет неравенству $i - \frac{k}{s} m > 0$.

Выводы

В работе предложена математическая модель выбора энергосберегающих мероприятий в системах тягового электроснабжения на основе усовершенствованного МАИ, что позволяет системно подходить к решению задач энергосбережения.

Предложенный ИС МАИ обеспечивает согласованность экспертных оценок на всех этапах ранжирования альтернатив. Работа эксперта упрощается тем, что размерность матриц предпочтений не превышает четырех, наличием геометрической интерпретации и отсечением возможности построения рассогласованных оценок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потребление и экономия электроэнергии в стационарной энергетике железнодорожного транспорта / под ред. А.Н. Поплавского. – М.: Транспорт, 1976. – 216с.
2. Кузнецов В.Г. Аналіз динаміки зміни "умовних" втрат електричної енергії в тяговій мережі / В.Г. Кузнецов, Т.І. Кирилук, Ю.М. Сергатиї // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С. 42-45.
3. Саати Т. Аналитическое планирование : Организация систем/ Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224с.
4. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев / В.Д. Ногин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2004. – т. 44. – № 7. – С. 1259-1268.

УДК 519.6+661.331:621.311

В.Г. Кузнецов В.Г., Шинкаренко В.И. **Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий в задачах планировании энергосберегающих мероприятий системы электро-снабжения железнодорожного транспорта** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 6 (77). – Днепропетровськ, 2011. – С. ?? - ??.

В работе предлагается новый подход к решению проблем энергосбережения, в частности, в системе электроснабжения тяги поездов постоянного тока. В соответствии с особенностями иерархии проблемы энергосбережения решается задача ранжирования мероприятий энергосбережения и объектов их внедрения. Предложен усовершенствованный метод анализа иерархий, которой обеспечивает согласованность матрицы предпочтений на всех этапах ранжирования.

Библ. 4, ил. 2, табл. 2.

УДК 519.6+661.331:621.311

Кузнецов В.Г., Шинкаренко В.И. **Інваріантно-узгоджений метод аналізу ієрархій в задачах планування енергозберігаючих засобів системи електропостачання залізничного транспорту** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Выпуск 6 (77). - Днепропетровськ, 2011. - С. ?? - ??.

У роботі пропонується новий підхід до вирішення проблеми енергозбереження, зокрема, у системі електропостачання тяги потягів постійного струму. Згідно з особливостями ієрархії проблеми енергозбереження вирішується задача ранжирування заходів енергозбереження та об'єктів їх провадження. Запропоновано вдосконалений метод аналізу ієрархій, котрий забезпечує узгодженість матриці переваг на усіх етапах ранжирування.

Бібл. 4, рис. 2, табл. 2.

UDC 519.6+661.331:621.311

V.G. Kuznetsov, V.I. Shynkarenko **Agreed-invariant method of analysis of hierarchies for planning energy saving measures in power supply systems of railway transport** // System technologies. N6(77) – Dnipropetrovsk, 2011. – P . ?? - ??.

In this paper the authors discussed a new approach to solve the energy saving problems, in particular, in the traction DC power supply systems of railways. Taking into account the peculiarities of the hierarchy problem it's solved the task of energy saving measures and the ranking of the objects for implementation. It's proposed the analytic hierarchy method, that ensures consistency of the preference matrix at all stages of the rankings.

Bibl. 4, il. 2, tabl. 2.

Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество ___ Кузнецов Валерий Геннадиевич

Организации, учреждение __ Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Должность, ученая степень, звание __ доцент, к.т.н., доцент

Почтовый адрес __ 49010 г. Днепропетровск, ул акад. В.Лазаряна,2 ДНУЖТ,
каф. Электроснабжение железных дорог

Телефон _056 – 393-19-21, 068-414-37-43_

Электронная почта __ vkuz@i.ua

Фамилия, имя, отчество ___ Шинкаренко Виктор Иванович

Организации, учреждение __ Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Должность, ученая степень, звание __ профессор, д.т.н., доцент

Почтовый адрес __ 49010 г. Днепропетровск, ул акад. В.Лазаряна,2 ДНУЖТ,
каф. Компьютерные информационные технологии

Телефон _056 – 373-15-35, 063-489-49-15

Электронная почта __ Shinkarenko_vi@ua.fm