

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 электрообеспечения 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 от-

бора в соответствии 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: Укрзализныци, 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 (173) и только 1 116 (23%) из них являются согласованными, при четырех альтернативах – 24 137 569 (176) и 749 886 (3%) соответственно.

Если отношение согласованности превышает допустимые пределы, эксперт по интуитивным представлениям может пытаться изменить оценки для повышения согласованности. Одним из выходов [4] является построение абсолютно согласованной матрицы, задавая только базовые оценки, вычисляя остальные согласно свойству транзи-

тивности. 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).

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



Рисунок 2 – Отметки соответствующие согласованной матрице предпочтений

Таблица 2

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 размером 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 $\forall a_{ij} = 0$.

Группировка альтернатив

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

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

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

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

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

Для каждой ${}^k \mathbf{B}$ строится матрицы предпочтений $[{}^k b_{ij}]$ и признаков $[{}^k u_{ij}]$ ${}^k b_{ij} = a_{pq}$, $p, q : ({}^k B_i = {}^{k-1} A_p \& {}^k B_j = {}^{k-1} A_q)$ и ${}^k u_{ij} = 0$. (4)

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

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

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

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

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

$${}^k b_{ij} = 1 / \nu \left(\sum_{l=1}^{\nu} ({}^k b_{it_d} / {}^k b_{t_dj}) \right) \text{ и } {}^k u_{ij} = 1. \quad (7)$$

Если после дополнения в матрице $[{}^k b_{ij}]$ остаются нулевые элементы, они определяются на основе ИС МАИ: формируется группа альтернатив ${}^k \tilde{\mathbf{B}} = [{}^k \tilde{B}_1, {}^k \tilde{B}_2, {}^k \tilde{B}_3]$ так, что для $\forall {}^k b_{ij} = 0 \exists {}^k \tilde{B}_p = {}^k B_i$. Матрица предпочтений $[{}^k \tilde{b}_{ij}]$ для группы ${}^k \tilde{\mathbf{B}}$ в интерактивном режиме определяется экспертом на основе ИС МАИ с ограничениями, согласно данным ранее оценкам эксперта ${}^k \tilde{b}_{ij} = \mu_p$. (8)

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

$$a_{ij} = {}^k \tilde{b}_{pq} \text{ при } {}^0 A_i = {}^k \tilde{B}_p \& {}^0 A_j = {}^k \tilde{B}_q. \quad (9)$$

Если в матрице $[{}^k b_{ij}]$ нет нулевых элементов, но она не согласована, выполняется ее согласование. Элементы ${}^k b_{ij}$ для которых ${}^k u_{ij} = 1$ изменяются

$${}^k b_{ij} = {}^k b_{ij} \pm {}^k \delta_{ij} = (\mu_p / {}^k b_{ij} + \mu_{p \pm q}), \quad (10)$$

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

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

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

Выполняется сортировка элементов в группах:

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

Соответственно переставляются элементы и в массиве альтернатив:

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

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 несогласованных 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. Сергачий // 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.