

УДК 621.311.001.2.577.47

Оценка проектных вариантов электрических сетей по условиям влияния на окружающую среду

КУЗЬМИН Я. Ф., канд. техн. наук, АРУМС А. Э., инж.

Рижский политехнический институт

С увеличением производства и потребления электроэнергии расширяется взаимосвязь электроэнергетических систем с окружающей средой. Объекты энергетики оказывают влияние на окружающую среду и наоборот окружающая среда оказывает воздействие на объекты энергетики, например, на надежность их работы.

Основным критерием для определения оптимальных проектных вариантов электрических сетей являются приведенные затраты. Однако при этом образуется область разноэкстремальных вариантов, значения приведенных затрат для которых отличаются незначительно (например, 5—15 % [1, 2]). В этих условиях оптимальный вариант должен определяться из числа равноэкстремальных по другим критериям, в том числе, по критерию влияния электрических сетей на окружающую среду.

Весь процесс взаимодействия электрических сетей с окружающей средой можно разделить на две составляющие:

- 1) воздействие электрических сетей на окружающую среду;
- 2) воздействие окружающей среды на электрическую сеть.

Последнее относится к вопросам надежности электрических сетей. В данной статье рассматривается только первая составляющая.

Электроэнергетическая система с позиции теории систем является динамической системой с причинно-следственными связями [3]. В данном случае основной целью является выявление проектных вариантов электрических сетей, минимально воздействующих на окружающую среду. Для реализации этой «глобальной» цели будем рассматривать ее как состоящую из множества подцелей или критериев. Такими критериями в данном случае являются: минимальный ущерб сельскому хозяйству, минимальное акустическое воздействие и т. д. Указанные критерии можно рассматривать как следствия. Выявим причины, их вызывающие. Например, для критерия (следствия) «акустическое воздействие» причиной является плотность населения, так как при отсутствии населения необходимость в этом критерии отпадает. Авторами предлагается в качестве примера следующие причинно-следственные связи.

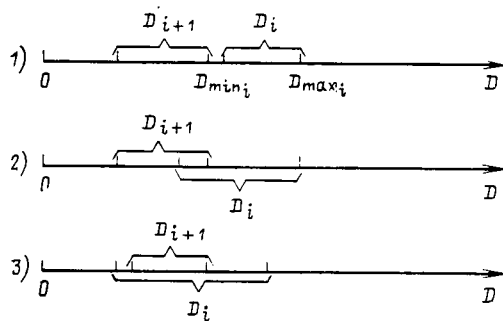


Рис. 1. Интерпретация результатов

Следствия: Y_1 — ущерб сельскому хозяйству; Y_2 — ущерб строительству; Y_3 — ущерб транспорту; Y_4 — воздействие на другие линии (телефонные, соседние ВЛ); Y_5 — изменение естественного ландшафта; Y_6 — сохранение культурных памятников; Y_7 — акустическое воздействие; Y_8 — эстетичность (соответствие ансамблю среды); Y_9 — радиопомехи.

Причины. X_1 — интенсивность сельского хозяйства; X_2 — интенсивность строительства; X_3 — интенсивность транспорта; X_4 — плотность прохождения других воздушных линий (телефонных, соседних ВЛ); X_5 — особенности географического расположения ВЛ (вырубка леса, рельеф, грунты, болото, река); X_6 — количество (или плотность) линий, воздействующих на культурные памятники; X_7 — плотность населения; X_8 — ограничения во время сооружения и ремонтов.

Данный перечень причин и следствий не претендует на полноту. Цель его — показать возможность выявления дополнительных критериев оптимизации в виде причинно-следственных связей и продемонстрировать на данном примере аппарата теории нечетких свидетельств. Причинно-следственную связь можно показать матрицей ПС (1 — если связь имеется; 0 — в противном случае):

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
X_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
X_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	0	1	1	1	0
X_7	0	0	0	0	0	0	1	1	1
X_8	1	1	1	1	0	1	0	0	0

Для проектирования развития электрических сетей необходимо уметь анализировать ситуации, которые невозможно точно предвидеть. Неполностью определенные процессы можно моделировать, пользуясь понятием нечеткого множества [4]. Развивая эту теорию в [4] введены понятия гранулярности информации и нечетких свидетельств. Теории нечетких множеств и нечетких свидетельств позволяют математически описать выявленные причинно-следственные связи.

Одну причинно-следственную взаимосвязь можно рассматривать как высказывание:

$$\text{если } X=X_1, \text{ то } Y=\pi(y|x_1), \quad (1)$$

где X — причина, принимающая четкое или нечеткое значение X_i ; Y — следствие (критерии), принимающее четкое или нечеткое значение $\pi_{(y|x)}$.

Цель проектировщика состоит в достижении значения $Y \Rightarrow Q$, где Q — оптимальное значение для рассматриваемого критерия. Во время проектирования будущие значения причины являются неоднозначными. Если X принимает неоднозначные значения, то и Y невозможно характеризовать однозначно. Используя эту неопределенную (нечеткую) информацию можно для одного критерия задавать ряд высказываний (1). Для характеристики случайности того, что $X = X_i$ используется вероятность $p_i(X_i)$. Таким образом можно описать множество проектных вариантов. Определение варианта, для которого достижение желаемого (оптимального) значения $Y \Rightarrow Q$ наиболее возможно, осуществляется использованием теории гранулярности и теории нечетких свидетельств [4].

В соответствии с терминологией теории гранулярности каждое высказывание (1) называется гранулой. Набор гранул вместе с вероятностями $p_i(X_i)$, описывающий одну причинно-следственную взаимосвязь, называется свидетельством E .

$$E = \left\{ \begin{array}{l} p_1, \pi_{(y|x)_1} \\ p_2, \pi_{(y|x)_2} \\ \vdots \\ p_n, \pi_{(y|x)_n} \end{array} \right\} = \{P_x, \pi_{(y|x)}\}, \quad (2)$$

где P_x — вероятностное распределение причины X ; $\pi_{(y|x)}$ — условное распределение следствия Y при данном X .

Предлагается следующая методика составления свидетельств.

1. Задаются функции принадлежности для лингвистических значений, которыми будут характеризоваться критерии Y . По существу это означает деление возможных значений каждого критерия на интервалы, где функции принадлежности используются для более конкретной характеристики каждого интервала.

2. Определяются значения причин (X) следующим образом: поле возможных значений причин делится на участки, придавая каждому участку арифметическое или лингвистическое значение.

3. Для каждого значения X_i , где $i=1, 2, \dots, n$ по одному Y записывается одна гранула. Вероятность p_i принимается по инженерной интуиции аналогично принимаемым вероятностным значениям состояний системы в будущем, используемым при составлении «платежных» матриц [5]. В результате получаем одно нечеткое свидетельство (2). Процесс повторяется для всех остальных Y .

4. Для каждого критерия задается его оптимальное значение Q . Для этого используется одно из его лингвистических значений, определенных в п. 1. Например, если лингвистические значения критерия, заданные в первом пункте {МАЛОЕ, СРЕДНЕЕ, БОЛЬШОЕ} и оптимальному значению критерия соответствует его минимальное значение, то $Q = \text{МАЛОЕ}$.

После составления свидетельств определяется оценка соответствия высказывания $|Y \text{ есть } Q|$ к свидетельствам для каждого критерия по каждому проектному варианту. Оценка такого соответствия определяется интервалом [4]

$$d = E\pi(Q) - EC(Q), \quad (3)$$

где $E\pi(Q)$ — ожидаемая емкость (верхняя граница интервала); $EC(Q)$ — условная определенность (нижняя граница интервала). Для упрощения записи в дальнейшем тексте при $E\pi$ и EC обозначение Q опускается.

Если число свидетельств n ,

$$E_1 = \left\{ \begin{array}{l} p_{11}, \pi_{(y|x_1)_{11}} \\ p_{12}, \pi_{(y|x_1)_{12}} \\ \vdots \\ p_{1k_1}, \pi_{(y|x_1)_{1k_1}} \end{array} \right\}, E_2 = \left\{ \begin{array}{l} p_{21}, \pi_{(y|x_2)_{21}} \\ p_{22}, \pi_{(y|x_2)_{22}} \\ \vdots \\ p_{2k_2}, \pi_{(y|x_2)_{2k_2}} \end{array} \right\}, \dots$$

$$\dots, E_n = \left\{ \begin{array}{l} p_{n1}, \pi_{(y|x_n)_{n1}} \\ p_{n2}, \pi_{(y|x_n)_{n2}} \\ \vdots \\ p_{nk_n}, \pi_{(y|x_n)_{nk_n}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^{k_1} p_{1i} = 1, \sum_{i=1}^{k_2} p_{2i} = 1, \dots, \sum_{i=1}^{k_n} p_{ni} = 1, \quad (5)$$

то значения $E\pi$ и EC определяются следующими выражениями:

$$E\pi = \sum_{i_1=1}^{k_1} \sum_{i_2=1}^{k_2} \dots \sum_{i_n=1}^{k_n} p_{1i_1} p_{2i_2} \dots p_{ni_n} \times \sup (Q \cap \pi_{(y|x_1)_{1i_1}} \cap \dots \cap \pi_{(y|x_n)_{ni_n}}), \quad (6)$$

$$EC = \sum_{i_1=1}^{k_1} \sum_{i_2=1}^{k_2} \dots \sum_{i_n=1}^{k_n} p_{1i_1} p_{2i_2} \dots p_{ni_n} \times (\sup (\pi_{(y|x_1)_{1i_1}} \cap \pi_{(y|x_2)_{2i_2}} \cap \dots \cap \pi_{(y|x_n)_{ni_n}}) - \sup (\bar{Q} \cap \pi_{(y|x_1)_{1i_1}} \cap \pi_{(y|x_2)_{2i_2}} \cap \dots \cap \pi_{(y|x_n)_{ni_n}})), \quad (7)$$

где знак \cap означает пересечение множеств; \bar{Q} — негация Q .

Нечеткое описание (4), (5) можно составить для любого числа проектных вариантов и ранжировать варианты по оценке соответствия d данному списку спланированному значению.

Нечеткие свидетельства могут задаваться на основе измерений (когда статистическая информация является недостаточной для применения вероятностных методов) или на основе интуиции и опыта лица, принимающего решения при оценке качественных критериев.

Предлагаемый метод можно применить также при смешанном характере исходной информации, т. е. причины и следствия могут принимать как четкие (детерминированные), так и нечеткие значения. Нечеткие значения задаются интервалами, границы которых в зависимости от определенности исходной информации также являются более или менее нечеткими. Для характеристики каждого интервала используются функции принадлежности, характеризующие принадлежность к определенному интервалу. Границы интервалов зависят от того, насколько определенной является исходная информация. Чем более неопределенной является информация, тем шире будут соответствующие интервалы. Из изложенного следует вывод, что результаты расчета

по предложенному методу, в какой-то мере, адаптируются к точности исходной информации. Метод позволяет также нечетко задавать оптимальное значение неплнностью определенных критериев Q .

Для сравнения различных вариантов по критерию влияния электрических сетей на окружающую среду необходимо получить оценку каждого варианта по объединенному воздействию от всех критериев, т. е. произвести свертку критериев. Первым этапом в этом направлении является выделение множества Парето [6]. Далее предлагается использовать решающее правило, которое представляет «меру близости» [6] к «идеальному» варианту:

$$D = \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{d_i^* - d_i}{d_i^* - d_i^0} = \sum_{i=1}^n \frac{[EC_i, E\pi_i]^* - [EC_i, E\pi_i]}{[EC_i, E\pi_i]^* - [EC_i, E\pi_i]^0}, \quad (8)$$

где d_i^* — оптимальное значение d ; d_i^0 — наименее предпочтительное значение d ; ρ_i — константа, характеризующая «вес» критерия.

Принято, что $\rho=1$, так как «веса» неявно учитываются при задании Q . Для «идеального» варианта имеется полное соответствие высказывания $|Y \text{ есть } Q|$ к свидетельствам. Тогда $d=0$; $E\pi=1$; $EC=1$. Аналогично для наименее предпочтительного варианта $E\pi=0$; $EC=0$. Тогда (8) преобразуется

$$D = \sum_{i=1}^n (|1, 1| - [EC_i, E\pi_i]). \quad (9)$$

Для выполнения арифметических операций с интервальными числами используется приведенная в [7] интервальная арифметика. Величина D рассчитывается для каждого варианта. Оптимальному варианту соответствует $\min D$. Так как D является интервалом, то возможны следующие случаи (рис. 1):

- 1) $D_{\min i} \geq D_{\max i+1}$ — по строгому предпочтению вариант A_{i+1} предпочтительнее A_i ;
- 2) $D_{\max i} > D_{\max i+1}$; $D_{\min i+1} < D_{\min i} < D_{\max i+1}$ — по нестроному предпочтению A_{i+1} предпочтительнее A_i ;
- 3) $D_{\max i} \geq D_{\max i+1}$; $D_{\min i} \leq D_{\min i+1}$ — предпочтение определить невозможно. В последнем случае рекомендуется делать уступку по Q (например, $Q=\text{ОЧЕНЬ МАЛОЕ}$ заменить на $Q=\text{МАЛОЕ}$) и повторить расчет.

Описанный метод позволяет, кроме рассмотренного, учитывать и другие дополнительные критерии при оценке проектных вариантов электрических сетей.

На основе рассмотренных теоретических разработок создана интерактивная система автоматизированного анализа проектных решений, которая состоит из двух главных программ и нескольких подпрограмм.

Главная программа $GP1$ позволяет в диалоговом режиме задавать или корректировать критерии (следствия), причины, причинно-следственные связи, функции принадлежности. Главная программа $GP2$ позволяет в диалоговом режиме описать проектные данные, их соответствие оптимальному значению каждого критерия и объединить оценки критериев по расстоянию от «идеального» варианта.

Используя интерактивную систему авторы решили некоторые практические задачи энергетики: сопоставление вариантов оригинальных повышенных над лесным массивом конструкций опор ВЛ; корректировка

планов строительства для передвижных механизированных колонн; сопоставление схем электроснабжения по надежности.

Пример. Требуется рассмотреть два варианта A_1 и A_2 схемы усиления внешнего электроснабжения крупного города на перспективу.

Приведенные затраты для обоих вариантов сопоставимы. Необходимо оценить варианты по критерию воздействия на окружающую среду. Для краткости изложения ограничимся следующими причинно-следственными связями: $Y_1, Y_3, Y_7, X_1, X_3, X_7, X_8$. Матрица

	Y_1	Y_3	Y_7
X_1	1	0	0
X_3	0	1	0
X_7	0	0	1
X_8	1	1	0

По приведенной в статье методике составим нечеткие свидетельства.

1. Для рассматриваемого примера используем на рис. 2 заданные функции принадлежности.

2. На основании имеющейся информации причина «интенсивность сельского хозяйства» делится на два интервала:

$X_{11}=\text{БОЛЬШАЯ}$; $X_{12}=\text{МАЛАЯ}$. Аналогично: $X_{31}=\text{БОЛЬШАЯ}$; $X_{32}=\text{ОЧЕНЬ БОЛЬШАЯ}$; $X_{71}=\text{МАЛОЕ}$; $X_{72}=\text{ОЧЕНЬ МАЛОЕ}$; $X_{81}=\text{МАЛОЕ}$; $X_{82}=\text{ОЧЕНЬ МАЛОЕ}$.

3. Используя информацию, характеризующую окружающую среду и также собственный опыт и интуицию, составляем описание причинно-следственных связей (нечеткие свидетельства):

- 1) по варианту A_1 для Y_1 :

Если с вероятностью $p_{11}=0,1$ интенсивность сельского хозяйства БОЛЬШАЯ, то ущерб сельскому хозяйству МАЛЫЙ. Если с вероятностью $p_{12}=0,9$ интенсивность сельского хозяйства МАЛАЯ, то ущерб сельскому хозяйству ОЧЕНЬ МАЛЫЙ.

Аналогично составляются остальные свидетельства: для Y_3 :

$$E_3 = \left\{ \begin{array}{l} 0,6 \text{ СРЕДНЕЕ} \\ 0,4 \text{ БОЛЬШОЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{31} = \text{БОЛЬШАЯ} \\ X_{32} = \text{ОЧЕНЬ БОЛЬШАЯ} \end{array}$$

$$E_8 = \left\{ \begin{array}{l} 0,2 \text{ МАЛОЕ} \\ 0,8 \text{ ОЧЕНЬ МАЛОЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{81} = \text{МАЛОЕ} \\ X_{82} = \text{ОЧЕНЬ МАЛОЕ} \end{array}$$

для Y_7 :

$$E_7 = \left\{ \begin{array}{l} 0,7 \text{ БОЛЬШОЕ} \\ 0,3 \text{ СРЕДНЕЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{71} = 50 - 70 \text{ чел./км}^2; \\ X_{72} = 20 - 50 \text{ чел./км}^2; \end{array}$$

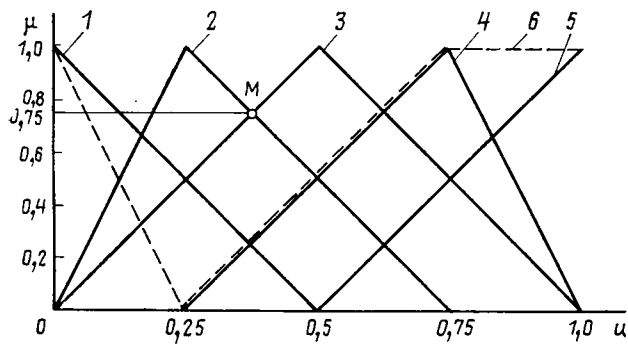


Рис. 2. Функции принадлежности:

u — нормализованные значения рассматриваемых критериев;
 μ — функция принадлежности; 1 — ОЧЕНЬ МАЛОЕ; 2 — МАЛОЕ; 3 — СРЕДНЕЕ; 4 — БОЛЬШОЕ; 5 — ОЧЕНЬ БОЛЬШОЕ; 6 — НЕ МАЛОЕ

2) по варианту A_2 :

для Y_1 :

$$E_1 = \left\{ \begin{array}{l} 0,1 \text{ СРЕДНЕЕ} \\ 0,9 \text{ МАЛОЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{11} = \text{БОЛЬШАЯ;} \\ X_{12} = \text{МАЛАЯ;} \end{array}$$

для Y_3 :

$$E_3 = \left\{ \begin{array}{l} 0,8 \text{ МАЛОЕ} \\ 0,2 \text{ СРЕДНЕЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{31} = \text{БОЛЬШАЯ;} \\ X_{32} = \text{ОЧЕНЬ БОЛЬШАЯ;} \end{array}$$

$$E_8 = \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \text{ ОЧЕНЬ МАЛОЕ} \\ 0,5 \text{ ОЧЕНЬ МАЛОЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{81} = \text{МАЛЫЕ;} \\ X_{82} = \text{ОЧЕНЬ МАЛЫЕ;} \end{array}$$

для Y_7 :

$$E_7 = \left\{ \begin{array}{l} 0,4 \text{ СРЕДНЕЕ} \\ 0,6 \text{ МАЛОЕ} \end{array} \right\} \begin{array}{l} X_{71} = 50 - 70 \text{ чел./км}^2; \\ X_{72} = 20 - 50 \text{ чел./км}^2. \end{array}$$

Задается оптимальное значение для каждого критерия. Для всех критериев $Q = \text{МАЛОЕ}$. $\bar{Q} = \text{НЕ МАЛОЕ}$.

Используя (6), (7) и заданные функции принадлежности (рис. 2), рассчитываем $E\pi$ и EC для каждого варианта по каждому критерию. Значения $\sup(Q \cap \pi_{(y_1, x_1)} \cap \pi_{(y_2, x_2)})$ (6), (7) определяются графически (рис. 2). Например, по A_1 для Y_3 : $\sup(\text{МАЛОЕ} \cap \text{СРЕДНЕЕ} \cap \text{МАЛОЕ}) = 0,75$ (точка М на рис. 2).

Результаты расчета $E\pi$ и EC приведены в таблице.

Применяя (9), получаем:

для варианта A_1 $D_1 = [1,272; 2,763]$;

для варианта A_2 $D_2 = [0,478; 1,957]$.

Обе границы интервала D_2 меньше границ интервала D_1 . Это означает, что вариант A_2 находится ближе к «идеальному» варианту, т. е. он предпочтительнее варианта A_1 .

Выводы. 1. Предлагаемый метод позволяет при сравнении проектных вариантов электрических сетей учесть

Критерии	Варианты			
	A_1		A_2	
	EC	$E\pi$	EC	$E\pi$
Ущерб сельскому хозяйству	0,050	0,703	0,475	0,915
Ущерб транспорту	0,112	0,450	0,168	0,636
Акустическое воздействие	0,075	0,575	0,400	0,900

их влияние на окружающую среду. Задачу выбора дополнительных критериев оптимизации проектной задачи можно рассматривать как процесс выявления причинно-следственных связей. Для математического описания этих связей применима теория нечетких свидетельств.

2. Предлагаемый метод дает возможность лицу, принимающему решение в виде высказываний (нечетких свидетельств), использовать всю имеющуюся информацию, учитывая при этом возможные состояния системы в будущем; отсутствует необходимость в применении «весовых» коэффициентов для критериев (следствий). Они неявно учитываются при указании оптимальных значений критериев Q .

3. Метод позволяет задавать исходную информацию интервальными значениями, где каждый интервал характеризуется функцией принадлежности. При этом выбор физических единиц измерения рассматриваемых критериев не имеет значения, так как в расчетах используются их нормализованные величины.

4. Результаты расчета методом теории нечетких свидетельств в какой-то мере адаптируются к точности исходной информации, так как чем более точная исходная информация, тем более определенными (узкими) будут соответствующие интервалы и их характеризующие функции принадлежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будзко И. А., Левин М. С. Особенности оптимизационных задач энергетики и методов их решения. — Электричество, 1981, № 3.
- Дале В. А., Кришан Э. П., Паэгле О. Г. Динамические методы анализа развития сетей энергосистем. — Рига: Зинатне, 1979.
- Электрические системы. Кибернетика электрических систем/ Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1974.
- Zadeh L. A. Fuzzy sets and information granularity. — In: Advances in fuzzy set theory and applications/ Ed.: M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager. — Amsterdam: North — Holland, 1979.
- Методические положения по выполнению оптимизационных (техничко-экономических) расчетов в энергетике при неоднозначности исходной информации. Иркутск — Москва: Изд. Науч. совета/ АН СССР по комплексным пробл. энергетики, 1977.
- Гафт М. Г. Принятие решений при многих критериях. — М.: Знание, 1979.
- Шокин Ю. И. Интервальный анализ. — Новосибирск: Наука, 1981. [21.09.84]