

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110–220 КВ

Шевченко Н. Ю., Лебедева Ю. В., Хавроничев С. В.

*ФГБОУ ВПО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет», г. Камышин, Россия (403874, г. Камышин, ул. Ленина, д. 6а), e-mail: kti@kti.ru*

В статье представлен алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией на примере выбора оптимального варианта повышения эффективности воздушных линий электропередачи, работающих в экстремальных метеоусловиях. На основании целей функционирования воздушной линии электропередачи выбраны частные критерии оценки вариантов реконструкции. Предложены критерии эффективности: комплексный показатель надежности, отражающий безотказность, долговечность и ремонтпригодность; критерий экономичности, учитывающий системный эффект от внедрения мероприятий, повышающих эффективность работы воздушных линий электропередачи, критерий технической эффективности и безопасности, учитывающий увеличение пропускной способности и снижение потерь электроэнергии. Составлена целевая функция оптимизации вариантов реконструкции воздушных линий электропередачи.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, реконструкция, гололедно-ветровые нагрузки, пропускная способность, энергоэффективность, система частных критериев, целевая функция оптимизации.

## THE ALGORITHM FOR CHOICE OF OPTIMAL VARIANT RECONSTRUCTION OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES OF 110–220 KV

Shevchenko N. J., Lebedeva J. V., Havronichev S. V.

*Kamyshin Institute of Technology (branch) of state educational institution of higher professional Education Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia (403874, Kamyshin, Lenin Street, 6a), e-mail: e-mail: kti@kti.ru*

This article is dedicated to the algorithm for multiobjective optimization problems with uncertain information on the example of choosing the best option efficiency overhead transmission line operating in extreme weather conditions. According to functioning purposes of overhead transmission lines, some particular criteria of reconstruction variants estimation have been chosen. Proposed performance criteria reliability: comprehensive, reflecting the reliability, durability and maintainability; the criterion of efficiency, taking into account the effect of the introduction of the system, increase the efficiency of overhead power lines, the criterion of technical efficiency and security, taking into account the increasing throughput and reducing energy losses. Is the objective function of optimization options for reconstruction of overhead electrical power lines.

Keywords: overhead transmission lines; reconstruction, ice-wind loads, bandwidth, energy efficiency particular criteria system, optimization function of a special purpose.

Разработка любой сложной системы связана с необходимостью выбора альтернатив, потому что они возникают как для системы в целом, так и для ее отдельных частей. При оценке вариантов реконструкции по многокритериальной модели необходимо учитывать специфику назначения, условия сооружения, функционирования и эксплуатации рассматриваемых систем. Решение задач оптимизации по многокритериальным моделям возможно на основе теории принятия решений. Общей методологической основой принятия решений служит системный анализ. Кроме многокритериальности задачи оптимизации характеризуются неопределенностью части исходной информации, например такой, как цены на оборудование, тарифы на электроэнергию, закон изменения электрических нагрузок, значения ущербов от перерывов электроснабжения и другие. Способ решения задач оптимизации по

многокритериальным моделям в условиях неопределенности исходной информации и применяемый математический аппарат зависят от наличия и возможности получения исходной информации. В настоящее время при решении задач оптимизации нет универсальных методов снятия неопределенности среды. Существует несколько способов решения многокритериальных задач: свертка критериев в единый оценочный функционал; приоритет важнейшего критерия, метод уступок, задания уровня притязания [1, 2, 3, 4]. При свертке нескольких критериев в единый оценочный функционал применяют традиционные виды сверток: аддитивную, мультипликативную и минимаксную.

В статье представлен алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией на примере выбора оптимального варианта повышения эффективности воздушной линии электропередачи, работающих в экстремальных метеоусловиях [5].

*1. Формулировка исходных данных.* Для снятия неопределенности исходных данных рассматриваются варианты с заданными техническими параметрами: номинальное напряжение, географическое и топографическое расположение линии, общая длина рассматриваемого участка, район по гололеду и нормативное ветровое давление.

*2. Обоснование цели разработки.* Решение о выборе оптимального варианта реконструкции воздушной линии электропередачи (ВЛ) должно приниматься с учетом достижения различных, иногда даже противоречивых целей –  $Q_i$ . Степень достижения каждой цели характеризуется количественно величиной соответствующего критерия оптимальности. Чтобы правильно сформулировать цель разработки, необходимо выяснить цель всей надсистемы и обосновать актуальность проблемы по ожидаемому вкладу в развитие энергетики. Основными целями воздушной линии электропередачи являются бесперебойное обеспечение потребителей электроэнергией высокого уровня качества с наименьшей себестоимостью передачи и распределения электроэнергии. Таким образом, можно выделить три основные цели ВЛ:

$Q_1$  – бесперебойное обеспечение потребителей электроэнергией;

$Q_2$  – минимальная себестоимость передачи электроэнергии;

$Q_3$  – передача максимальной мощности с минимальными потерями.

*3. Выделение объекта разработки.* Данный этап содержит описание места и роли объекта в надсистеме, выделение пространственных и временных границ разрабатываемого объекта и поля поиска нового технического решения.

*4. Постановка задачи:* включает выделение исходных данных (неуправляемых факторов), обоснование требований к разработке и выбираемым параметрам.

*5. Обоснование и выбор системы частных критериев.* Выбор критериев оценки вариантов производится на основе анализа целей функционирования системы  $Q_i$ . Критерии достиже-

ния целей будем называть локальными и обозначать  $f_q$ ,  $q=1\dots i$ , где  $q$  – индекс локального критерия,  $i$  – число этих критериев. Если критерии имеют различные единицы измерения, то их требуется нормализовать. Разработано большое количество схем нормализации, большинство из которых основываются на введении идеальных значений критериев  $\bar{f}$ , с помощью которых вектор критериев приводится к безразмерной форме –  $\bar{F} = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \bar{f}_i)$ . Каждая компонента вектора может принимать значения в диапазоне (0;1).

Степень достижения каждой цели можно количественно охарактеризовать следующими критериями оптимальности: надежностью воздушной линии электропередачи  $f_n$ , экономичностью  $f_{эк}$ , и технической эффективностью  $f_{тех·эф}$ .

Комплексный показатель надежности отражает безотказность, долговечность, ремонтпригодность ВЛ. Так как самые тяжелые последствия вызывают гололедно-ветровые нагрузки, то механический коэффициент запаса прочности  $k_n$  можно рассчитать как отношение предельной толщины стенки гололеда  $b_n$ , разрывающей провод при максимальной скорости и температуре воздуха –  $5^0$  С, к расчетной толщине стенки  $b_p$  гололеда до реконструкции ( $f_1 = k_n = \frac{b_n}{b_p}$ ). Другими показателями могут служить: снижение потокоотказов

$f_2 = k_\omega = \frac{\omega_{рек}}{\omega_{исх}}$ ; уменьшение времени восстановления поврежденного участка

$f_3 = k_{t_6} = \frac{t_{6.рек}}{t_{6.исх}}$ ; увеличение долговечности линии  $f_4 = k_D = \frac{D_{рек}}{D_{исх}}$ .

Критерий надежности примет вид:

$$f_n = k_n \cdot k_\omega \cdot k_{t_6} \cdot k_D = \prod_{q=1}^n (f_q)_{ji} \rightarrow \max \quad (1)$$

Себестоимость передачи и распределения электроэнергии определяют отношением текущих затрат по передаче к количеству полезно отпущенной потребителям электроэнергии. Для ее снижения необходимо снизить потери в линии, т. е. выполнить условие  $\Delta P \rightarrow \min$ . Критерием экономичности может служить максимум чистого дисконтированного дохода:

$$f_{эк} = ЧДД_i = \sum_{t=1}^T \frac{D_{t ij} - I_{t ij} - K_{t ij} - Y_t}{(1 + E)^t} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $i$  – номер варианта;  $T$  – период сравнения;  $D$  – доход от реализации электроэнергии в год  $t$ ,  $I_{ijt}$  – издержки в  $j$ -й элемент схемы в год  $t$ ,  $K_{it}$  – капитальные вложения в  $j$ -й элемент схе-

мы в год  $t$ , руб.;  $V_{ii}$  – ущерб от недоотпуска электроэнергии;  $E$  – норма дисконта, выраженная в долях единицы или в процентах в год.

Техническую эффективность работы воздушной линии электропередачи можно характеризовать энергетическим коэффициентом  $K_{\text{энер}}$  и пропускной способностью по току  $I_{\text{пр}}$ .

Энергетический коэффициент определяет степень эффективности передачи электроэнергии и определяется по формуле:

$$K_{\text{энер}} = K_{\phi} \cdot K_{\text{кнд}}, \quad (3)$$

где  $K_{\phi}$  – относительный коэффициент мощности, определяемый после компенсации реактивной мощности;  $K_{\text{кнд}}$  – коэффициент полезного действия ВЛ, который определяется по выражению:

$$K_{\text{кнд}} = \frac{P}{P + \Delta P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{кор}}}, \quad (4)$$

где  $P$  – нагрузка, кВт;  $\Delta P_{\text{н}}$  – нагрузочные потери, кВт;  $\Delta P_{\text{кор}}$  – потери на корону, кВт.

Тогда локальный критерий технической эффективности и безопасности:

$$f_{\text{тех.эф}} = (K_{\text{энер}} \rightarrow \max; I_{\text{пр}} \rightarrow \max; f < f_{\text{max}}). \quad (5)$$

где  $f$  – стрела провеса провода.

6. *Формулировка стратегии достижения целей.* На основании имеющихся технических и экономических соображений разрабатываются возможные альтернативные варианты реконструкции линии  $\phi_n$ , обеспечивающие достижение установленных целей. После данного этапа в распоряжении лица, принимающего решение ЛПР, оказывается матрица множества взаимоисключающих решений  $\Phi = \{\phi_1; \phi_2; \phi_3, \phi_n\}$ .

7. *Оценка климатических нагрузок.* Для составленных вариантов реконструкции производится оценка ожидаемых механических нагрузок на провода ВЛ при всех возможных сочетаниях климатических условий.

8. *Анализ состояния среды.* Средой является система явлений и параметров, влияющих на исход решения, обычно они носят неопределенный характер. В качестве среды  $\Theta$  можно принять закон изменения электрической нагрузки во времени. Дополнительная информация может быть получена в виде статистической или экспертной оценки.

9. *Расчет матриц значений частных критериев.* Производим оценку полезности решения разработанных стратегий  $\phi_1 \div \phi_n$  с помощью ПЭВМ и составляем матрицы частных критериев  $f_1, \dots, f_i$ . Все семейство решений описывается матрицей решений (табл. 1), содержащей  $n$ -вариантов решений и  $m$ - состояний среды.

Таблица 1

Матрицы частных критериев оценки вариантов

Состояние среды $\Theta_1 - \Theta_m$	Частных критерии							
	$f_1$ ,				$f_n$ ,			
	Варианты реконструкции				Варианты реконструкции			
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_n$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_n$
$\Theta_1$	$e_{11}$	$e_{12}$	$e_{13}$	$e_{1n}$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{1n}$
$\Theta_2$	$e_{21}$	$e_{22}$	$e_{23}$	$e_{2n}$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$B_{2n}$
$\Theta_m$	$e_{m1}$	$e_{m2}$	$e_{m3}$	$e_{mn}$	$B_{m1}$	$B_{m2}$	$B_{m3}$	$B_{mn}$

10. Выбор способа свертки частных критериев в единый оценочный функционал. При свертке нескольких критериев в единый оценочный функционал применяют традиционные виды свертки: аддитивную, мультипликативную и минимаксную. В результате данного этапа получается матрица оценочного функционала (табл. 2).  $F = \{F_{in}\}$ , характеризующего «выигрыш»/ «проигрыш» при выборе решения  $\varphi_n \in \Phi$ , если среда будет находиться в состоянии  $\Theta_m$  при этом  $F_{in} = f(\varphi_n; \theta_m)$ .

Таблица 2

Матрица оценочного функционала

Вероятность m-го состояния среды $P_m$	Оценочный функционал F вариантов $\varphi_1 - \varphi_n$			
	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_2$	$\varphi_n$
$p_1$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{1n}$
$p_2$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$	$F_{2n}$
$P_m$	$F_{m1}$	$F_{m2}$	$F_{m3}$	$F_{mn}$

11. Выбор оптимального решения. Вид оценочной функции определяется позицией ЛПР (лицо, принимающее решение).

Оптимистическая позиция ориентирует на выбор варианта с максимальной полезностью. Оценочная функция примет вид:

$$F_{onm} = \max_j (\max_i F_{ij}). \quad (6)$$

Пессимистическая позиция ориентирует на выбор варианта с максимальной полезностью при наихудших условиях. Оценочная функция:

$$F_{onm} = \max_j (\min_i F_{ij}). \quad (7)$$

Нейтральная позиция ориентирует на выбор варианта с максимальной средней полезностью по оценочной функции:

$$F_{onm} = \max_j \left( \sum_{i=1}^{i=n} F_{ij} / n \right). \quad (8)$$

Существует множество критериев выбора лучшего решения по матрице оценочного функционала.

При дискретно заданных вероятностях наиболее устойчивым и обоснованным является критерий Байеса – Лапласа, согласно которому оптимальным становится решение, соответствующее максимуму (минимуму) математического ожидания оценочного функционала:

$$F_{opt} = \sum_{i=1}^n (p_j F_i) \rightarrow \max(\min) \wedge \sum_{j=1}^m p_j = 1, \quad (9)$$

где  $p_j$  – вероятность проявления среды;  $m$  – число рассматриваемых изменений среды;  $F_i$  – значение оценочного функционала при  $i$ -м темпе роста нагрузки.

Оптимальным считается решение, обеспечивающее наибольшее приближение к заранее сформулированным целям.

$$F_{opt} = \sum_{i=1}^n (p_i F_i) \rightarrow \max. \quad (10)$$

12. *Обоснование принятия решения* производится с учетом требований заказчика.

13. *Рассчитываются показатели экономической эффективности* выбранного варианта реконструкции: срок окупаемости, индекс доходности, интегральный эффект, рентабельность.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рис. 1.

Вывод

Дальнейшее развитие и совершенствование теории принятия решений в условиях неопределенности зависит от накопления опыта решения многокритериальных задач в энергетике. Для повышения эффективности и объективности принимаемых решений необходим комплексный подход к формулированию и применению принципов оценки эффективности инвестиций в проекты реконструкции. В качестве указанных принципов можно рекомендовать: принцип доминирования, Парето, формирование комплексных показателей, выделение главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений, отбор недоминирующих альтернатив, аддитивной свертки.

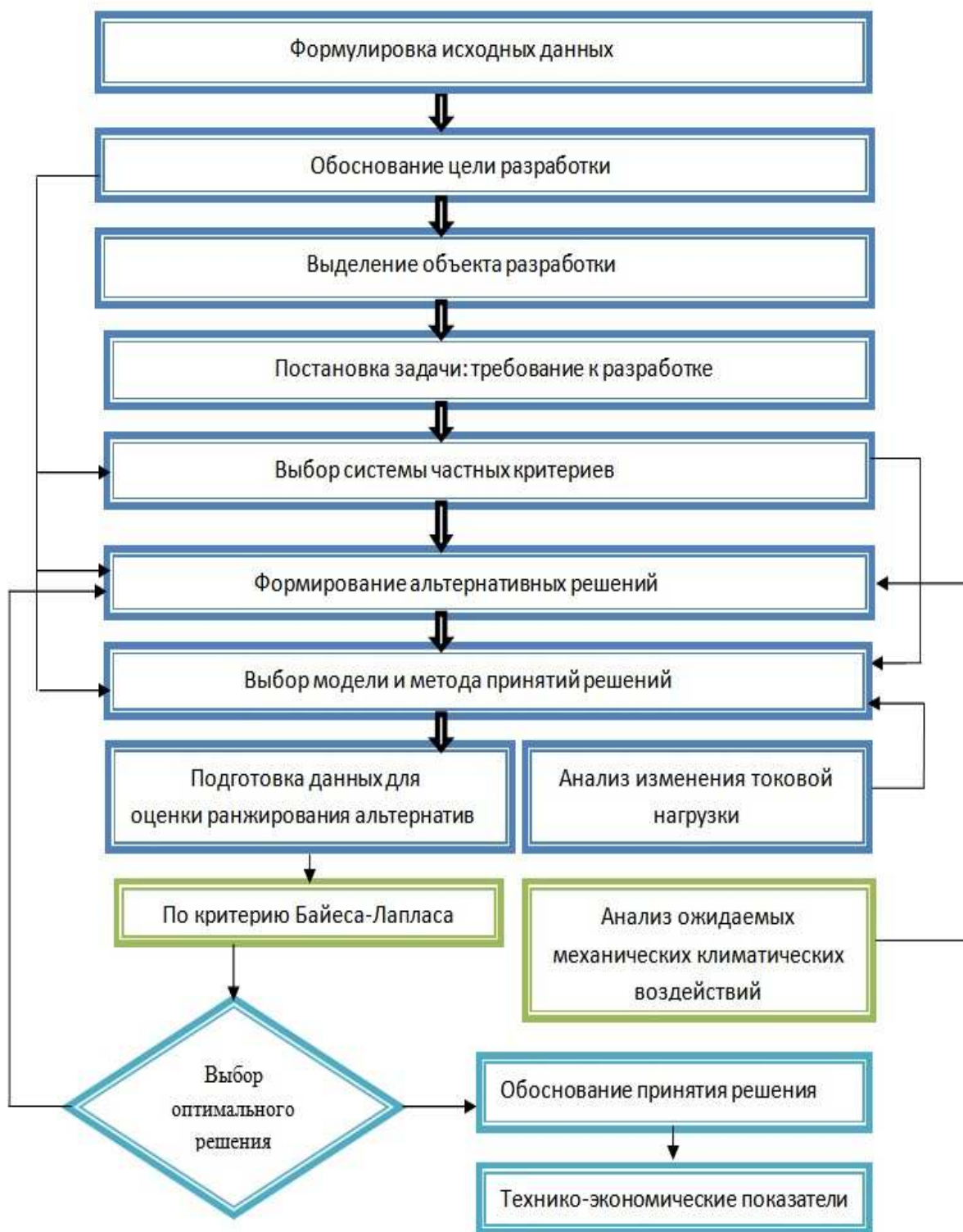


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения многокритериальной задачи

### Список литературы

1. Алгоритм многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией на примере выбора оптимальной мощности глубокого ввода высокого напряжения / Т. Б. Ле-

щинская и [др.] // Электричество. – 2004. – № 10. – С. 8-14.

2. Левин М. С., Лещинская Т. Б. Методы теории решений в задачах оптимизации систем электроснабжения / Под ред. И. А. Будзко. – М.: ВИПКэнерго, 1989. – 130 с.

3. Лещинская Т. Б. Применение методов многокритериального выбора при оптимизации систем электроснабжения сельских районов // Электричество. – 2003. – № 1. – С. 14-21.

4. Лещинская Т. Б., Магадеев Э. В. Экспертная система оценки надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Электрика. – 2008. – № 4. – С. 30-35.

5. Шевченко Н. Ю. Повышение эффективности реконструируемых воздушных линий электропередач, подверженных экстремальным метеовоздействиям: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2011. – С. 77-84.

#### **Рецензенты:**

Артюхов И. И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ЭПП СГТУ, Саратовский государственный университет, г. Саратов.

Угаров Г. Г., д.т.н., профессор кафедры ЭПП СГТУ, Саратовский государственный университет, г. Саратов.