

УДК 621.316.1.05:519.85

## СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВЕТВЛЕННОЙ СЕКЦИОНИРОВАННОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Тимчук С. А., к.т.н.,  
Фурман И. А., д.т.н.,  
Сиротенко М. А.

*Харьковский национальный технический университет сельского  
хозяйства им. Петра Василенко*  
Тел. (057) 712-35-37

**Аннотация** – приведены результаты математического моделирования технико – экономических показателей эффективности сети электроснабжения в нечеткой форме, модернизированный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации разветвленной секционированной сети электроснабжения, эффективность которых проиллюстрирована на конкретном примере.

**Ключевые слова** – распределительные сети электроснабжения, технико-экономические показатели, нечеткое моделирование, многокритериальность, генетические алгоритмы

*Постановка проблемы.* При проектировании и реконструкции систем электроснабжения (СЭС) в оптимизационных задачах для оценки технико-экономической эффективности применяются такие показатели, как годовой недоотпуск электроэнергии потребителям вследствие поломок и аварий ( $W$ ), приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию СЭС ( $Z$ ), годовые транспортные потери в СЭС ( $N$ ). Данные показатели используются в качестве целевых функций при формировании отношения предпочтения. То есть оптимизационная задача является многокритериальной. Расчет этих показателей осложнен неопределенностью исходной информации. А выбор метода оптимизации дополнительно осложнен большой размерностью множества альтернатив ( $>10^{30}$  элементов), что делает неэффективным применение методов попарных сравнений альтернатив и традиционных поисковых методов.

*Анализ последних исследований.* Существует математический аппарат, корректно описывающий неопределенность типа случайности (теория вероятностей), который целесообразно

применять к процессам, связанным с ожиданием появления событий, последствия которых нам неизвестны, и неопределенность типа нечеткости (теория нечетких множеств), который связан с проблемой неоднозначного решения последствий событий, которые уже состоялись, или лингвистической неопределенностью целей [1, 4].

Приведенные выше технико – экономические показатели интегральные. Поэтому применение стохастических моделей в данном случае не является корректным. Традиционно применяемые детерминированные математические модели вносят существенные упрощения и порождают проблему точности, которую для достаточно сложных систем определить весьма. Детерминированные математические модели приведены в справочниках по проектированию СЭС [1]. Параметры, входящие в эти модели, определяются на основе статистических данных, т. е. по сути каждый параметр имеет не одно, а множество значений. Если же статистические данные из разных источников имеют разную степень доверия, то это множество органично представляется в виде нечеткого множества, где степень доверия к значению параметра является степенью принадлежности его к нечеткому множеству. Поскольку данная форма представления параметров существенно усложняет проведение математических операций, то нечеткие множества представляются в виде аналитической аппроксимации с помощью так называемых  $(L-R)$ -функций, а конкретнее – в виде треугольных нечетких чисел [2].

*Целью данной работы* является презентация одного из подходов к решению указанных проблем на основе разработки новых методик и методов моделирования СЭС, использующих теорию нечетких множеств, нечеткий анализ, векторную оптимизацию, сочетающую детерминированный, эволюционный и нечеткий подход.

*Основная часть.* Носитель треугольного нечеткого числа определяется достаточно просто:

$$p_{\min} = \min_i p_i, \quad p_{\max} = \max_i p_i, \quad p_i \in P, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $P$ - множество значений параметра.

Для получения модального значения треугольного нечеткого числа применен метод нечеткого усреднения [2].

$$p_m = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}. \quad (2)$$

Таким образом, вместо множества нечетких значений параметра получим треугольное нечеткое число с носителем  $\{p_{min}, p_{max}\}$  и ядром (модальным значением)  $p_m$ .

Функция принадлежности треугольного нечеткого числа имеет вид:

$$\mu_{\Delta} = \max(0, \min(\frac{p - p_{min}}{p_m - p_{min}}, \frac{p_{max} - p}{p_{max} - p_m})) \quad (3)$$

Если хотя бы один из параметров, входящих в детерминированную математическую модель расчета технико – экономических показателей эффективности СЭС является нечетким числом, то, согласно обобщенным операциям Задэ [2], результаты математических операций будут нечеткими числами. Соответственно, полученные в результате расчетов нечеткие значения технико – экономических показателей эффективности СЭС содержат в себе как значения с наибольшим доверием (модальные), так и интервалы неопределенности (носители множеств).

Таким образом, данный подход является более общим, чем детерминированный, автоматически решает проблему точности и может использовать наработки, полученные в рамках детерминированного подхода.

Задача принятия решений в общем виде может быть описана множеством допустимых выборов (альтернатив) и заданным на этом множестве отношением предпочтения, которое отражает интересы лица (организации), принимающего решение (ЛПР). Принятие решения заключается в выборе допустимой альтернативы, которая лучше или не хуже остальных альтернатив в смысле заданного отношения предпочтения.

В случае анализа системы электроснабжения задача принятия решений содержит конечный набор функций полезности ( $W, Z, N$ ). В этом случае тяжело определить единственное решение, поскольку эти функции противоречивы. Обычно процесс сводится к определению множества Парето.

Задача математического программирования для конечного числа функций цели формулируется следующим образом [3]:

$$\begin{aligned} f_i(x) \rightarrow \max, \varphi_j(x) \leq 0, x \in X, \\ i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X$  – заданное множество альтернатив,  $f_i : X \rightarrow R^1, \varphi_j : X \rightarrow R^1$  - функции цели и ограничений.

Принцип Парето в общем случае определяет эффективное решение (недоминируемое) таким, которое не может быть улучшено одновременно по всем целевым функциям при заданных условиях. Т.е. альтернатива  $x_0$  будет недоминируемой, если

$$f_i(x_0) \geq f_i(x), i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

причем, по крайней мере при одном  $i$ , неравенство (5) строгое.

Все недоминируемые решения образуют множество Парето  $X_0 \subset X$  и, если  $X_0 \neq \emptyset$ , то задача (4) имеет решение.

В случае нечетко заданных целевых функций неравенство (5) однозначно решается только в случае, если сравниваемые нечеткие числа не пересекаются. В противном случае указанное неравенство по сути является нечетким и эта нечеткость должна быть раскрыта, например, вводом индекса ранжирования [4], который для случая треугольных нечетких чисел имеет вид:

$$f_1 \geq f_2, \text{ если } f_{1min} \geq f_{2min}, f_1 \leq f_2, \text{ если } f_{1max} \leq f_{2max}, \quad (6)$$

где  $f_1 = \langle f_{1min}, f_{1m}, f_{1max} \rangle$ ,  $f_2 = \langle f_{2min}, f_{2m}, f_{2max} \rangle$ .

Основной проблемой при выборе метода оптимизации для конкретной задачи является размерность множества альтернатив.

При структурной оптимизации СЭС, состоящей из 10 участков, число возможных вариантов построения составит  $3,57 \cdot 10^{32}$ . Решение подобного рода задач прямыми поисковыми методами и методами, требующими предварительного определения всего множества альтернатив технически нереализуемо.

В данной ситуации возникает необходимость применения эволюционных алгоритмов [5]. Для рассматриваемого класса задач представляется перспективным применение генетического алгоритма с внедренными операторами местного поиска, основанными на методах математического программирования.

Типовой генетический алгоритм состоит из следующих операций.

1. Формирование начальной популяции объема. Для каждой особи генерируются коды генов случайным образом.

2. Оператор скрещивания. Каждой отцовской особи случайно подбирается материнская особь. Случайно выбирается ген материнской особи и заменяет соответствующий ген отцовской особи, образуя особь ребенка. Особь ребенка, превосходящая в данной системе критериев обоих родителей, добавляется в популяцию. Процедура скрещивания ведет к улучшению жизнеспособности (в системе принятых критериев) особей популяции.

3. Оператор мутации. Для каждой особи случайно выбирается ген и его код генерируется заново. Жизнеспособный (удовлетворяющий ограничениям) мутант заменяет особь в популяции. Процедура мутации может как улучшать, так и ухудшать жизнеспособность особей. Это не позволяет процессу свестись к поиску локального оптимума.

4. Оператор ранжирования и отсева. Из популяции удаляются наименее жизнеспособные особи.

5. Формирование множества элитарных особей. Из текущей популяции отбираются наиболее жизнеспособные особи и те из них, которые не хуже элитарных, добавляются в это множество.

Для рассматриваемого класса задач типовой генетический алгоритм доработан. Вместо традиционной жесткой процедуры ранжирования и отсева особей введен возраст особей, измеряемый числом поколений. Особи, возраст которых превышает срок жизни, удаляются из популяции. Популяция может развиваться или угасать, поэтому срок жизни может по ходу развития популяции изменяться в ту или иную сторону в зависимости от ресурса ареала (возможности конкретного компьютера). Если число особей превысило верхний предел (приемлемое время обсчета популяции), то срок жизни уменьшается и популяция угасает до нижнего предела по численности, после чего срок жизни снова увеличивается. Для каждого конкретного компьютера верхний предел размера популяции определяется индивидуально. В автоматическом режиме он может быть определен по времени расчета популяции (по опыту оно не должно превышать 5 минут). Нижний предел размера популяции должен быть не ниже размера множества элитарных особей.

Для выделения элитарных особей в генетический алгоритм внедрена процедура нелинейного программирования на основе метода попарных сравнений альтернатив по условию (6).

Условием прекращения поиска является отсутствие пополнения множества элитарных особей в течение заданного числа поколений.

При структурной оптимизации СЭС множество альтернатив является четким поскольку на данный момент известны конкурентные варианты технического исполнения элементов СЭС и их возможные сочетания в рамках единой сети. Нечеткость же содержится в описании целевых функций и функций ограничений.

Проиллюстрируем эффективность приведенного подхода на конкретном примере. Пусть СЭС содержит 25 абонентских ТП10/0,4 кВ, 29 участков линии электропередачи, среднегодовая мощность электропотребления по каждой ТП задана. Топология сети определена. Необходимо для каждого участка СЭС определить следующие структурные параметры: наличие секционирующего аппарата, тип ЛЭП, сечение проводов, тип коммутирующего аппарата на входе ТП, Число трансформаторов в ТП и наличие и тип резервирования. То есть для

каждого участка может быть рассмотрено 160 вариантов построения, а для всей СЭС число альтернатив составляет  $160^{29}$ .

Введем следующие ограничения на структурные параметры проектируемой сети:

- рассматриваются варианты только воздушных линий электропередач;
- сечения проводов берутся из номенклатурного ряда (25, 35, 50, 70, 95) мм<sup>2</sup>;
- сечение проводов последующего по ходу подачи электроэнергии участка не выше сечения проводов предыдущего участка;
- в качестве коммутирующего аппарата на входе в ТП10/0,4 кВ рассматриваются разъединители и масляные выключатели;
- напряжение на входе каждой ТП10/0,4 кВ должно находиться в пределах  $10 \pm 0,5$  кВ;
- ТП10/0,4 кВ могут иметь один или два трансформатора, в последнем случае по нижнему напряжению возможно резервирование, выполняемое оперативно-выездной бригадой, дежурным диспетчером дистанционно или аппаратурой автоматического ввода резерва.

Для работы генетического алгоритма зададим систему кодирования особи. Особь в данном случае – это альтернатива (вариант построения СЭС).

Ген особи (участок сети) однозначно определяется вариантом секционирующего аппарата ( $n_{CA}$ ), типом ЛЭП ( $n_{ЛЭП}$ ), вариантом коммутирующего аппарата на входе в ТП ( $n_{КА}$ ), вариантом ТП ( $n_{ТП}$ ), сечением проводов ЛЭП ( $n_F$ ).

Таким образом, особь определяется следующим выражением:

$$G = [N, \Psi] = (g_j), j = \overline{1, n_u}, \quad (7)$$

где  $n_u$  – число участков СЭС.

Фенотип особи имеет следующий вид:

$$N = (n_j); n_j = (n_{CA}^j, n_{ЛЭП}^j, n_{КА}^j, n_{ТП}^j, n_F^j), j = \overline{1, n_u}. \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned} n_{CA}^j &= (n_{CA_{i_{CA}}}), i_{CA} = \overline{0, k_{CA}}, n_{ЛЭП}^j = (n_{ЛЭП_{i_{ЛЭП}}}), i_{ЛЭП} = \overline{0, k_{ЛЭП}}, \\ n_{КА}^j &= (n_{КА_{i_{КА}}}), i_{КА} = \overline{1, k_{КА}}, n_{ТП}^j = (n_{CA_{i_{ТП}}}), i_{ТП} = \overline{0, k_{ТП}}, \\ n_F^j &= (n_{CA_{i_F}}), i_F = \overline{0, k_F}. \end{aligned}$$

Все составляющие гена дискретные и целочисленные, поэтому рационально применить десятичную систему кодирования (генотип почти совпадает с фенотипом). Операторы преобразования фенотипа к генотипу (кодирования) и обратного преобразования имеют вид:

$$\Psi : g_j = (g_j^1, g_j^2, g_j^3, g_j^4, g_j^5) = (i_{CAj}, i_{ЛЕПj}, i_{KAj}, i_{ТПj}, i_{Fj}), \quad j = \overline{1, n_u}. \quad (9)$$

$$\Psi^{-1} : n_j = (n_{CA_{i_{CAj}}}, n_{ЛЕП_{i_{ЛЕПj}}}, n_{KA_{i_{KAj}}}, n_{ТП_{i_{ТПj}}}, n_{F_{i_{Fj}}}), \quad j = \overline{1, n_u}. \quad (10)$$

В качестве целевых функций приняты технико – экономические показатели эффективности СЭС ( $W, Z, N$ ) в нечеткой форме.

Поиск решения осуществлялся с помощью программной реализации разработанного генетического алгоритма. В течение 31,5 часов найдено множество Парето, состоящее из 338 решений (рис. 1).

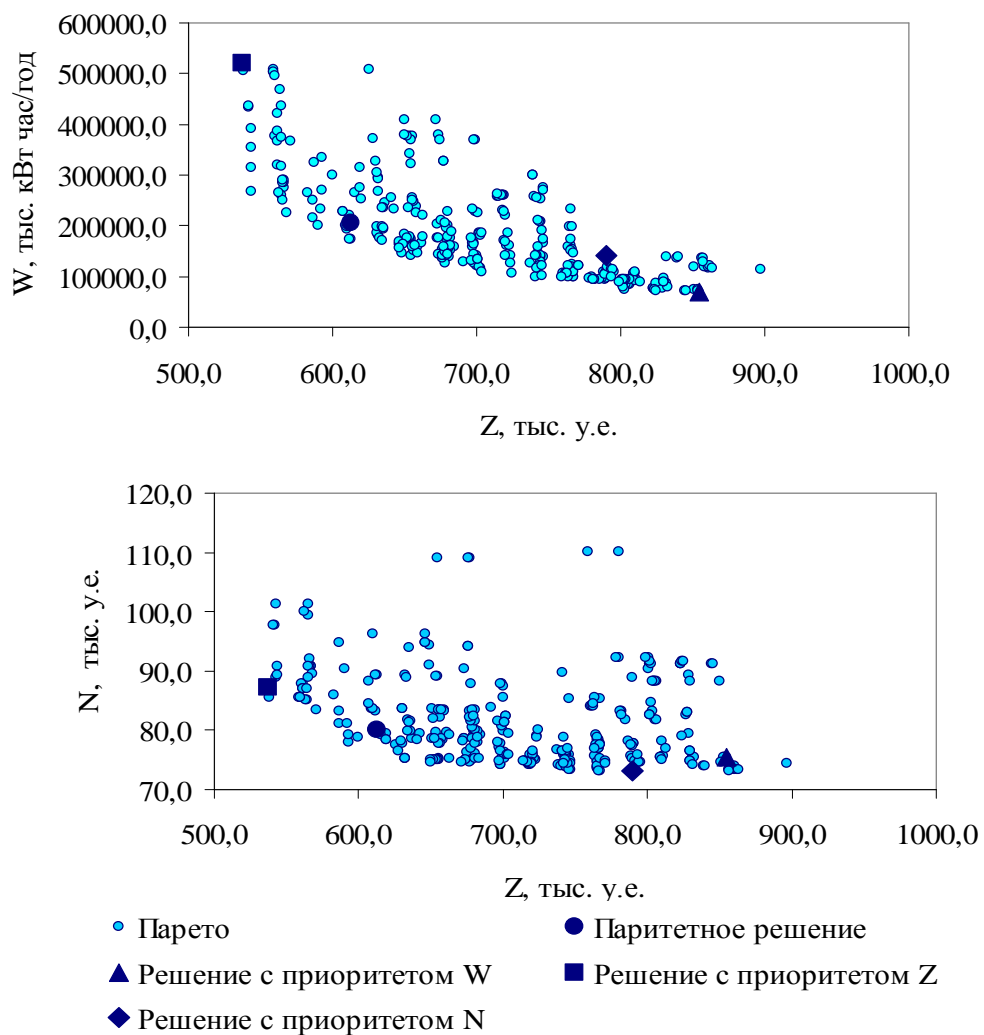


Рис. 1. Решения задачи в пространстве целевых функций.

Поскольку из такого множества ЛПР трудно выбрать единственное решение, то для его поиска применен нечеткий метод [6]. Данный метод основан на вводе нечеткой свертки целевых функций эллипсоидной формы. С его помощью на множестве Парето определено паритетное по всем целевым функциям решение, а также решения с приоритетом по каждой из целевых функций (рис. 1). Последнее необходимо для обоснования принятого решения.

Паритетное решение после процедуры декодирования приведено на рис. 2.

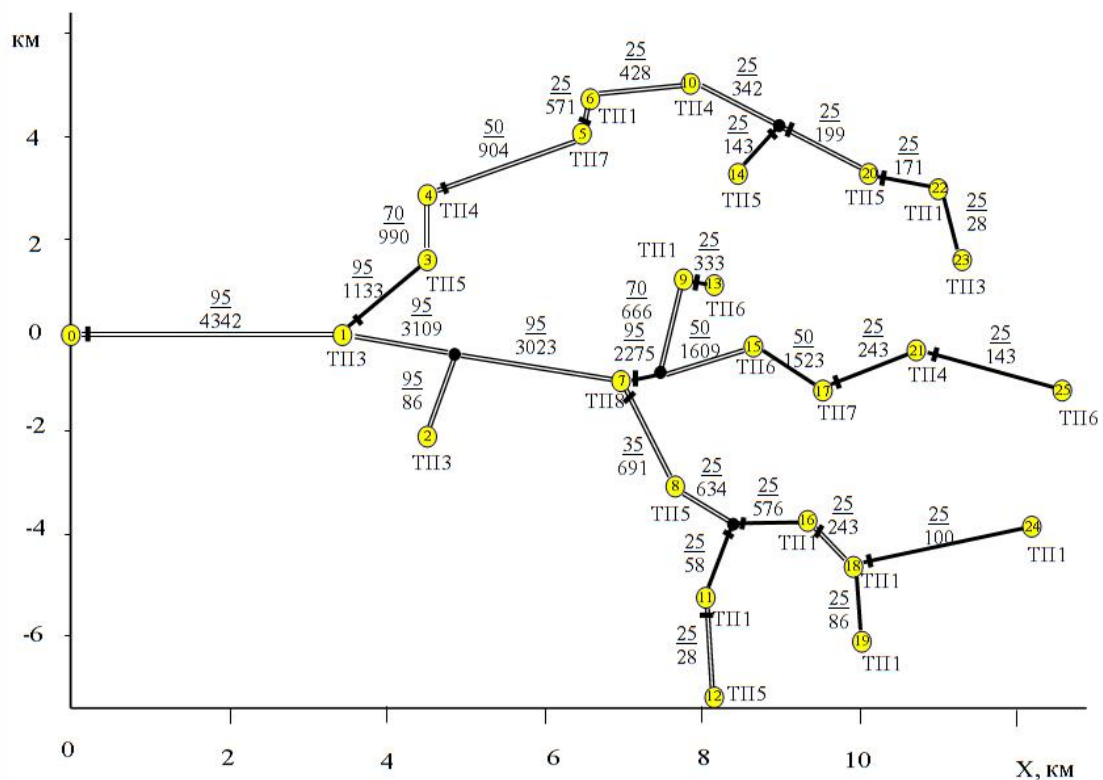


Рис. 2. Паритетное решение после декодирования.

Здесь кружочками с номерами обозначены трансформаторные подстанции, двойной линией обозначена двухцепная ЛЭП, одинарной – одноцепная, короткая линия – наличие на участке секционного аппарата. Цифра в числителе над каждым участком – сечение проводов, в знаменателе – среднегодовая мощность на участке. Варианты трансформаторных подстанций: ТП1, ТП5 – однострансформаторная соответственно с разъединителем и выключателем на входе, ТП2-ТП4 – двухтрансформаторные с разъединителем на входе и резервированием соответственно оперативно-выездной бригадой, дежурным диспетчером, автоматикой; ТП6-ТП8 – двухтрансформаторные с выключателем на



входе и резервированием соответственно оперативно-выездной бригадой, дежурным диспетчером, автоматикой.

*Выводы.* Таким образом, предложенный методический аппарат позволяет решать задачи поиска оптимальных проектных решений в условиях неопределенности исходной информации, многокритериальности для систем, обладающих достаточно большим множеством альтернатив. Данный методический аппарат позволяет использовать разработанные ранее детерминированные математические модели и преобразовать их в нечеткие. Разработанный вариант генетического алгоритма с внедренными операторами местного поиска, основанными на методах математического программирования, и оригинальным оператором ранжирования позволяет за приемлемое время решать многокритериальные оптимизационные задачи, которые технически невозможно решить другими методами без существенных упрощений. Поскольку теоретическая и алгоритмическая часть разработаны в общем виде, данный аппарат может применяться для решения оптимизационных задач не только в области энергетики.

#### Литература:

1. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича.- М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2006.- 348 с.
2. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets / Lotfy Zadeh // Information and Control, 1965. - Vol. 8. - P. 338 — 353.
3. *Орловский С.А.* Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский.- М.: Наука, 1981.- 208 с.
4. *Раскин Л.Г.* Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Лев Григорьевич Раскин, Оксана Владимировна Серая. – Х.: Парус, 2008. – 352 с.
5. *Carrano E.G.* Electric Distribution Network Multiobjective Design Using a Problem-Specific Genetic Algorithm / Eduardo G. Carrano, Luiz A. E. Soares, Ricardo H. C. Takahashi, Rodney R. Saldanha, and Oriane M. Neto // IEEE Transactions on power delivery. - V. 21. - №. 2. - 2006. – P. 995 – 1005.
6. *Тимчук С.А.* Метод поиска множества недоминируемых решений в нечеткой форме [Текст] / С. А. Тимчук // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 1-ї Міжнар. наук.-техн. Конф. - Черкаси: Маклаут, 2011.- С. 129.

**СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗГАЛУЖЕНОЇ  
СЕКЦІОНІРОВАНОЇ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В  
УМОВАХ МНОГОКРИТЕРІАЛЬНОСТІ Й НЕВИЗНАЧЕНОСТІ  
ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ**

Тимчук С.О., Фурман І. О., Сиротенко М.О.

*Анотація* - Наведені результати математичного моделювання техніко – економічних показників ефективності мережі електропостачання в нечіткій формі, модернізований генетичний алгоритм многокритеріальної оптимізації розгалуженої секціонованої мережі електропостачання, ефективність яких проілюстрована на конкретному прикладі.

**STRUCTURAL MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF  
BRANCHED PARTITIONED POWER NETWORK UNDER  
UNCERTAINTY INITIAL INFORMATION**

S. Tymcuk, I. Furman, M. Sirotenko

*Summary*

The results of mathematical modeling of techno - economic performance power supply network in a fuzzy form, modernized multiobjective genetic algorithm optimization partitioned extensive supply network, the effectiveness of which is illustrated by a specific example.