

УДК 658.012

## Многокритериальный выбор высоковольтного выключателя для электрической подстанции на основе применения прямого метода анализа иерархии

Е.М. Вотякова, Б.А. Гнатюк, Б.А. Староверов  
ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,  
г. Кострома, Российская Федерация  
E-mail: sba44@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В связи с тем, что высоковольтные выключатели имеют ограниченные ресурс коммутаций и срок службы, неизбежно возникает задача по выбору им замены. Выбор данного оборудования приходится делать с учетом многих факторов, среди них цена, страна производитель, срок гарантийного обслуживания и другие. В связи с этим определение наиболее подходящего оборудования из предлагаемых различными производителями вариантов является актуальной задачей многокритериального выбора из имеющихся альтернатив.

**Материалы и методы:** Для решения задачи многокритериального выбора применяется прямой метод анализа иерархии. Данный метод экспертных оценок сочетает опыт, знания, интуицию лиц, принимающих решение, а также современные технологии автоматизированной поддержки принятия решений.

**Результаты:** На примере выбора высоковольтного выключателя показаны эффективность и наглядность применения прямого метода анализа иерархии. Составлена иерархия критериев для выбора высоковольтного выключателя. Применены функции принадлежности для количественных критериев.

**Выводы:** Использование прямого метода анализа иерархии для многокритериального выбора технического оборудования дает возможность сделать обоснованный выбор, учесть все предъявленные требования, ранжировать варианты по их соответствию. Составленная иерархия критериев является универсальной и может применяться многократно и на множестве объектов.

**Ключевые слова:** электрическая подстанция, многокритериальный выбор, метод анализа иерархии, прямой метод, функция принадлежности, высоковольтный выключатель.

## Multiple criteria selection of high voltage circuit breakers for power substations using direct analytic hierarchy process

E.M. Votyakova, B.A. Gnatyuk, B.A. Staroverov  
Kostroma State University of Technology, Kostroma, Russian Federation  
E-mail: sba44@mail.ru

### Abstract

**Background:** As the commutation life and service life of high-voltage circuit breakers are limited, it inevitably causes a problem of selecting suitable equipment for their replacement. Such selection should account for different factors such as price, country of production, after-sales service, etc. Therefore, such multiple criteria problem of selecting suitable equipment among the variants produced by different companies is quite urgent nowadays.

**Materials and methods:** This multiple-criteria selection problem is solved by direct analytical hierarchy process. This expert evaluation method is based on experience, knowledge and intuition of decision makers, as well as modern technologies of automated decision support.

**Results:** The convenience and clarity of the direct analytical hierarchy process is demonstrated by the example of high-voltage circuit breaker selection. A criteria hierarchy has been built to select high-voltage circuit breakers, with the quantitative criteria determined by applying membership functions.

**Conclusions:** The direct hierarchy process for multiple criteria selection of engineering equipment allows making well-founded decisions, meeting all requirements and grading the alternatives according to their correspondence. The built hierarchy is universal and can be used repeatedly in different projects.

**Key words:** power substation, multiple criteria selection, analytic hierarchy process, direct method, membership function, high voltage circuit breaker.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.070-075

**Состояние вопроса.** Высоковольтные выключатели для подстанций напряжением свыше 110 кВ являются ответственным и дорогостоящим оборудованием. В настоящее время многие фирмы предлагают оборудование с отличающимися техническими, эксплуатационными и другими параметрами. В связи с этим возникает проблема выбора оптимального оборудования исхо-

дя из большого количества критериев, которую можно кратко сформулировать как соотношение цена-качество. Все показатели, которые определяют выбор того или иного вида выключателя, можно разделить на 2 группы. К первой группе относятся технические параметры, которые зависят от установленных норм функциональных требований к работе электрической подстанции и

не зависят от конструктивного исполнения [1, 2]. К таким параметрам относятся:

- 1) номинальное напряжение;
- 2) номинальный ток;
- 3) номинальный ток отключения;
- 4) номинальный ток включения;
- 5) ток термической стойкости при заданной длительности протекания этого тока;
- 6) ток электродинамической стойкости;
- 7) собственное время отключения выключателя;
- 8) полное время отключения выключателя.

Эти параметры являются обязательными, и у выбираемого оборудования значения соответствующих параметров, указанных в пунктах 1–6, должны быть не ниже рассчитанных, а для параметров в пунктах 7 и 8 – не выше рассчитанных.

Ко второй группе относятся параметры, которые характеризуют предпочтение того или иного варианта в зависимости от конъюнктурной ситуации, санкций (страна производитель), финансового положения заказчика (цена), наличия сервисного обслуживания и т.п. Выбор типа выключателя по таким параметрам не регламентирован строгими требованиями и часто вызывает затруднения при интуитивном подходе, так как он связан с поиском компромиссного решения. В связи с этим проблему можно охарактеризовать как выбор наилучшего варианта из имеющихся альтернатив, предлагаемых рынком по неформализуемым вышеперечисленным параметрам, выступающим в качестве критериев.

**Методы исследования.** Для решения задач многокритериального выбора разработано большое количество методов, основанных на экспертных оценках [3, 4]. Анализ этих методов показывает, что наиболее удобно в рассматриваемом случае использовать метод анализа иерархии (МАИ) [3].

Использование данного метода делится на следующие этапы:

- 1) структуризация задачи в виде иерархии с несколькими уровнями;

2) попарное сравнение элементов каждого уровня;

3) вычисление весовых коэффициентов элементов каждого уровня;

4) вычисление результирующих весовых коэффициентов каждой из альтернатив и их ранжирование по этим показателям.

Наиболее сложной и слабо формализуемой задачей является формирование иерархии критериев. Исходя из опроса экспертов, в качестве критериев первого уровня иерархии выбраны:

- 1) страна производитель;
- 2) срок гарантийного обслуживания;
- 3) цена выключателя;
- 4) характеристика фирмы-производителя;
- 5) тип дугогасящей среды.

На следующем уровне осуществляется де-тализация отдельных критериев (рис. 1).

Критерии «Срок гарантийного обслуживания» и «цена» представляют собой количественные величины, поэтому их необходимо перевести в относительные единицы, изменяющиеся в пределах от 0 до 1. Зависимость, по которой количественный критерий переводится в относительные единицы (баллы), является, по существу, функцией принадлежности текущей величины количественного показателя (критерия) к множеству предпочтительных величин этого показателя.

Определение функции принадлежности представляет собой самостоятельную задачу, так как эти функции должны отражать весь диапазон числовых характеристик изделий, предлагаемых рынком, и предпочтения покупателя [6]. Эти предпочтения формируются в свою очередь также из большого количества противоречивых требований, и поэтому эта задача практически не формализуема. Поэтому функция принадлежности также должна определяться экспертно в табличной, графической или аналитической форме. На рис. 2,а представлена функция принадлежности по ценовому показателю, а на рис. 2,б – функция принадлежности по сроку гарантийного обслуживания. Данные графики получены путем обобщения мнений экспертов.

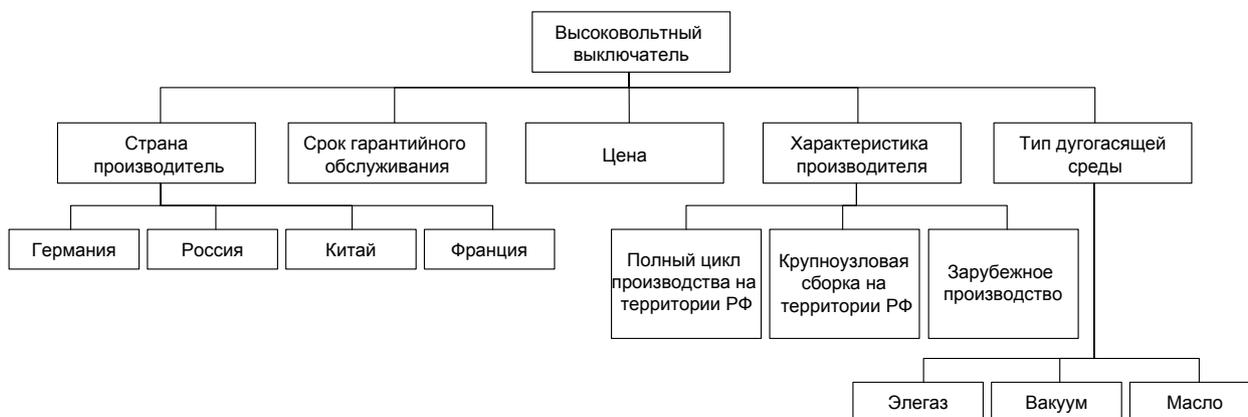


Рис. 1. Иерархия критериев выбора высоковольтного выключателя

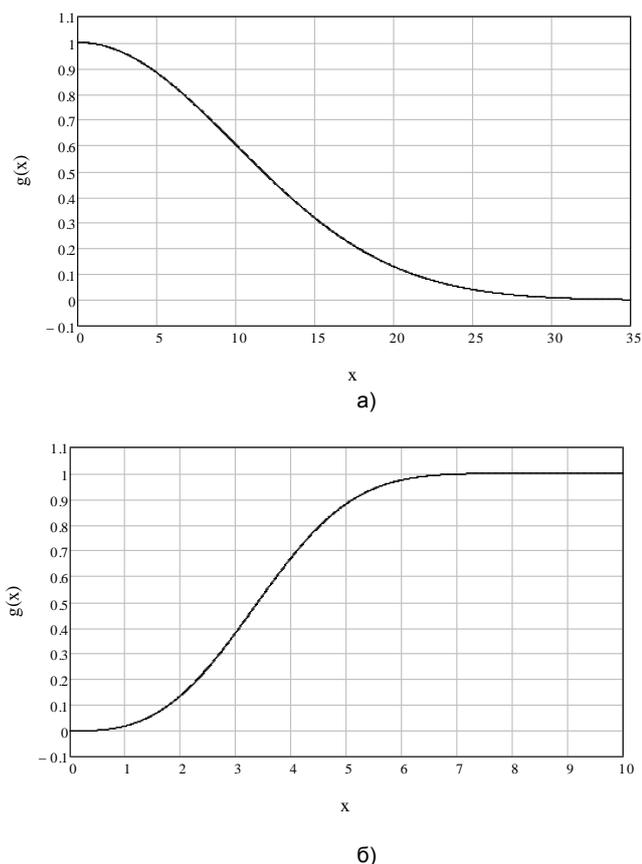


Рис. 2. Графики функций принадлежности: а – функция принадлежности по ценовому показателю (в млн руб.); б – функция принадлежности по сроку гарантийного обслуживания (годы)

Для определения весовых коэффициентов критериев используется прямой метод анализа иерархии, основанный на определении аддитивного соотношения значений веса критериев, входящих в иерархию [5]. Для решения поставленной задачи по выбору высоковольтного выключателя используется сравнение «по образцу». При таком сравнении  $n$  критериев ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ) формируются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 &w_1^{(1)} + w_2 = 1; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &w_1^{(i)} + w_{i+1} = 1; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &w_1^{(n-1)} + w_n = 1,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $w_1^{(i)}$  – коэффициент веса критерия  $A_i$  (образца) в соотношении с  $A_{i+1}$  образцом;  $w_{i+1}$  – коэффициент веса критерия  $A_{i+1}$  в соотношении с критерием  $A_1$ .

Из соотношений аддитивной оценки весовых коэффициентов (1) определяются переходные попарные отношения весовых коэффициентов:

$$a_{12} = \frac{w_1^{(1)}}{w_2}; \quad a_{13} = \frac{w_1^{(2)}}{w_3}; \quad \dots \quad a_{1n} = \frac{w_1^{(n-1)}}{w_n}.
 \tag{2}$$

В соответствии с правилом нормализации должно соблюдаться равенство

$$w_1^{(n)} + w_2^{(n)} + \dots + w_i^{(n)} + \dots + w_{n-1}^{(n)} + w_n^{(n)} = 1
 \tag{3}$$

или

$$w_1^{(2)}(1 + a_{21} + \dots + a_{i1} + \dots + a_{n1}) = 1,
 \tag{4}$$

где

$$a_{21} = \frac{1}{a_{12}}; \quad \dots \quad a_{i1} = \frac{1}{a_{1i}}; \quad \dots \quad a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}}.
 \tag{5}$$

Из (4) и (5) следует, что

$$w_1^{(n)} = \frac{1}{1 + a_{21} + \dots + a_{i1} + \dots + a_{n1}}.
 \tag{6}$$

Остальные весовые коэффициенты определяются следующим образом:

$$w_2^{(n)} = a_{21}w_1^{(n)}; \quad \dots \quad w_n^{(n)} = a_{n1}w_1^{(n)},
 \tag{7}$$

где  $i = 2, \dots, n$ .

В результате выражения (1)–(7) позволяют получать значения весовых коэффициентов сравниваемых критериев или альтернатив без формирования матрицы парных сравнений, которая необходима при применении «классического» МАИ [3]. В этом случае также отпадает необходимость проверки согласованности экспертных оценок.

Для удобства определения весовых коэффициентов иерархия критериев (рис. 1) представляется в виде отдельных фрагментов (рис. 3–6). На рис. 3 представлены первый и второй уровни иерархии.

Методика прямого метода МАИ состоит из следующих этапов.

Первым шагом является определение «образцового» критерия и попарное сравнение с ним остальных.



Рис. 3. Первый и второй уровни иерархии: A1 – страна производитель; A2 – срок гарантийного обслуживания; A3 – цена; A4 – характеристика производителя; A5 – тип дугогасящей среды

**Результаты исследований.** В рассматриваемом случае экспертами за «образцовый» был взят критерий А1. В результате получены следующие соотношения:

$$w_1^{(1)} + w_2 = 1, \text{ или } 0,3 + 0,7 = 1;$$

$$w_1^{(2)} + w_3 = 1, \text{ или } 0,2 + 0,8 = 1;$$

$$w_1^{(3)} + w_4 = 1, \text{ или } 0,2 + 0,8 = 1;$$

$$w_1^{(4)} + w_5 = 1, \text{ или } 0,1 + 0,9 = 1.$$

Далее по формуле (2) определяются переходные попарные отношения весовых коэффициентов:

$$a_{12} = \frac{w_1^{(1)}}{w_2}, \text{ или } 0,3/0,7 = 0,43.$$

Аналогично определяются остальные попарные отношения:

$$a_{13} = 0,25; a_{14} = 0,25; a_{15} = 0,11$$

Затем по выражению (6) и с учетом выражения (5) определяется  $w_1$ :

$$w_1 = \frac{1}{1 + \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \frac{1}{a_{15}}}.$$

Подстановка в это выражение численных значений соответствующих коэффициентов попарных отношений дает следующий результат:

$$w_1 = 1/(1 + 1/0,43 + 1/0,25 + 1/0,25 + 1/0,11) = 0,05.$$

Далее по выражению (7) определяются остальные весовые коэффициенты:

$$w_2 = 0,1; w_3 = 0,2; w_4 = 0,2; w_5 = 0,45.$$

Расчеты весовых коэффициентов для других уровней аналогичны, поэтому их целесообразно автоматизировать, используя, например, электронную таблицу Microsoft Excel.

На рис. 4 представлена иерархия критерия «Страна производитель».



Рис. 4. Иерархия критерия «Страна производитель»: А1.1 – Германия; А1.2 – Россия; А1.3 – Китай; А1.4 – Франция

В табл. 1 представлены экспертные оценки весовых коэффициентов, полученные путем сравнения попарных соотношений с «образцом», где за «образцовый» взят критерий А1.1.

Таблица 1. Таблица попарных соотношений

Германия	Россия	Китай	Франция
0,4	0,6	–	–
0,7	–	0,3	–
0,6	–	–	0,4

В табл. 2 представлены рассчитанные с помощью электронной таблицы итоговые весовые коэффициенты.

Таблица 2. Итоговые весовые коэффициенты

Германия	Россия	Китай	Франция
$w_{11}$	$w_{12}$	$w_{13}$	$w_{14}$
0,28	0,42	0,12	0,18

На рис. 5 изображена иерархия критерия «Характеристика производителя».



Рис. 5. Иерархия критерия «Характеристика производителя»: А4.1 – полный цикл производства на территории РФ; А4.2 – крупноузловая сборка на территории РФ; А4.3 – зарубежное производство

В табл. 3 представлены экспертные оценки весовых коэффициентов, полученные путем сравнения попарных соотношений с «образцом», где за «образцовый» взят критерий А4.1.

Таблица 3. Таблица попарных соотношений

Полный цикл производства на территории РФ	Крупноузловая сборка на территории РФ	Зарубежное производство
0,7	0,3	–
0,8	–	0,2

В табл. 4 представлены рассчитанные по данным табл. 3 итоговые весовые коэффициенты.

Таблица 4. Итоговые весовые коэффициенты

Полный цикл производства на территории РФ	Крупноузловая сборка на территории РФ	Зарубежное производство
$w_{41}$	$w_{42}$	$w_{43}$
0,60	0,25	0,15

На рис. 6 изображена иерархия критерия «Тип дугогасящей среды».



Рис. 6. Иерархия критерия «Тип дугогасящей среды»: А5.1 – элегаз; А5.2 – вакуум; А5.3 – масло

В табл. 5 представлены экспертные оценки весовых коэффициентов. За «образцовый» взят критерий А5.1.

Таблица 5. Таблица попарных соотношений

Элегаз	Вакуум	Масло
0,6	0,4	–
0,8	–	0,2

В табл. 6 представлены итоговые весовые коэффициенты.

Таблица 6. Итоговые весовые коэффициенты

Элегаз	Вакуум	Масло
$w_{51}$	$w_{52}$	$w_{53}$
0,52	0,35	0,13

В табл. 7 приведены параметры сравниваемых альтернатив (цены на изделия даны усредненные).

Таблица 7. Параметры и их коэффициенты веса сравниваемых альтернатив

Альтернативы	Страна производитель	Срок гарантийного обслуживания	Цена	Характеристика производителя	Тип дугогасящей среды
Альтернатива 1	Германия $w_{11}^1=0,28$	5 лет $w_{21}^1=0,9$	10 млн руб. $w_{31}^1=0,6$	Зарубеж. производ.	Элегаз $w_{43}^1=0,15$
Альтернатива 2	Китай $w_{12}^2=0,12$	3 года $w_{22}^2=0,4$	7 млн руб. $w_{32}^2=0,75$	Крупноузл. сбор. РФ	Элегаз $w_{51}^2=0,25$
Альтернатива 3	Франция $w_{13}^3=0,18$	4 года $w_{23}^3=0,65$	9 млн руб. $w_{33}^3=0,62$	Зарубеж. производ.	Вакуум $w_{43}^3=0,15$
Альтернатива 4	Россия $w_{14}^4=0,42$	2 года $w_{24}^4=0,15$	5 млн руб. $w_{34}^4=0,88$	Полный цикл, РФ	Масло $w_{41}^4=0,60$

В соответствии с данными табл. 7 для каждой альтернативы из табл. 2, 4, 6 определяются весовые коэффициенты качественных параметров. По графикам (рис. 2) определяются весовые коэффициенты числовых (количественных) параметров альтернатив  $w_{2i}^j$  и  $w_{3i}^j$ , где  $i = 1...4$  – номер альтернативы.

Заключительным этапом является ранжирование альтернатив в соответствии с выбранными критериями и их весами.

Суммарное количество баллов альтернативы  $i$  определяется следующим образом:

$$B_i = w_{1j}^i w_1 + w_{2i}^j w_2 + w_{3i}^j w_3 + w_{4k}^i w_4 + w_{5l}^i w_5, \quad (8)$$

где  $w_{1j}^i, w_{2i}^j, w_{3i}^j, w_{4k}^i, w_{5l}^i$  – весовые коэффициенты параметров сравниваемых альтернатив (табл. 7);  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$  – групповые весовые коэффициенты критериев второго уровня иерархии.

Подстановка в (8) числовых значений соответствующих весовых коэффициентов дает следующие результаты:

- для альтернативы 1

$$B_1 = 0,28 \cdot 0,05 + 0,9 \cdot 0,1 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,15 \cdot 0,2 + 0,52 \cdot 0,45 = 0,488 \text{ баллов};$$

- для альтернативы 2

$$B_2 = 0,12 \cdot 0,05 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,75 \cdot 0,2 + 0,25 \cdot 0,2 + 0,52 \cdot 0,45 = 0,48 \text{ баллов}.$$

- для альтернативы 3

$$B_3 = 0,18 \cdot 0,05 + 0,65 \cdot 0,1 + 0,62 \cdot 0,2 + 0,15 \cdot 0,2 + 0,35 \cdot 0,45 = 0,3855 \text{ баллов}.$$

- для альтернативы 4

$$B_4 = 0,42 \cdot 0,05 + 0,15 \cdot 0,1 + 0,88 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,13 \cdot 0,45 = 0,3905 \text{ баллов}.$$

В результате альтернатива 1 является наиболее предпочтительной. Однако на альтернативу 2 стоит обратить внимание, так как суммарное количество баллов второй альтернативы отличается от суммарного количества баллов первой альтернативы менее чем на 2 %. Для осуществления выбора между альтернативами 1 и 2 необходимо использовать дополнительный критерий, например учет политики санкций.

**Выводы.** На рассмотренном примере выбора высоковольтного выключателя для электрической подстанции показана эффективность использования прямого метода анализа иерархии с попарным сравнением соотношений весовых коэффициентов критериев и рассматриваемых альтернативных решений.

Данный метод перспективен для многокритериального выбора и других технических средств и систем оснащения электрических подстанций.

#### Список литературы

1. **Кишиневский Д.В., Рудаков О.В.** Новая парадигма «Цифровой подстанции» // Вестник связи. – 2014. – № 11. – С. 33–34 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vestnik-sviaz.ru>.
2. **Хабдуллина З.К., Акылбек Б.Ж.** Сравнительный анализ высоковольтных выключателей // Научные достижения биологии, химии, физики: материалы междунар. заоч. науч.-практич. конф. – Новосибирск: Изд-во «Сибирская ассоциация консультантов», 2012. – С. 103–108.
3. **Саати Т.Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
4. **Ногин В.Д.** Принятие решений при многих критериях. – СПб.: ИУТАС, 2007. 104 с.
5. **Гнатюк А.Б., Вотякова Е.М., Староверов Б.А.** Решение задачи многокритериального выбора технической компоновки цифровой подстанции с помощью прямого метода анализа иерархии // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 2. – С. 54–60. doi: 10.17588/2072-2672.2016.2.054-060.
6. **Вотякова Е.М., Гнатюк Б.А.** Применение функций принадлежности в методе анализа иерархий // Бюл-

*Вотякова Елизавета Михайловна,*  
ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,  
аспирант кафедры автоматизации и микропроцессорной техники,  
e-mail: elzvtk@gmail.com

*Гнатюк Борислав Алексеевич,*  
ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,  
аспирант кафедры автоматизации и микропроцессорной техники,  
e-mail: gnatyukb@gmail.com

*Староверов Борис Александрович,*  
ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматизации и микропроцессорной техники,  
e-mail: sba44@mail.ru

летень науки и практики. Электрон. журн. – 2016. – № 4(5). – С. 99–107. <http://www.bulletennauki.com>

#### References

1. Kishinevsky, D.V., Rudakov, O.V. Novaya paradigma «Tsifrovoy podstantsii» [The new paradigm of «A digital substation»]. *Vestnik svyazi*, 2014, no. 11, pp. 33–34. Available at: <http://www.vestnik-sviaz.ru>
2. Khabdullina, Z.K., Akylbek, B.Zh. Sravnitel'nyy analiz vysokovol'tnykh vyklyuchateley [A comparative analysis of high voltage circuit breakers]. *Materialy mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnye dostizheniya biologii, khimii, fiziki»* [Proceedings of the international correspondence scientific and practical conference «Scientific achievements in biology, chemistry and physics»]. Novosibirsk, Izdatel'stvo «Sibirskaya assotsiatsiya konsul'tantov», 2012, pp.103–108.
3. Saati, T.L. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision Making. Analytic Hierarchy Process]. Moscow, Radio i svyaz', 1993. 320 p.
4. Nogin, V.D. *Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Multiple criteria decision making]. Saint-Petersburg, YuTAS, 2007. 104 p.
5. Gnatyuk, A.B., Votyakova, E.M., Staroverov, B.A. Reshenie zadachi mnogokriterial'nogo vybora tekhnicheskoy komponovki tsifrovoy podstantsii s pomoshch'yu pryamogo metoda analiza ierarkhiy [Solving multiple criteria selection problems for choosing digital substation components by using direct analytic hierarchy process]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 2, pp. 54–60. doi: 10.17588/2072-2672.2016.2.054-060.
6. Votyakova, E.M., Gnatyuk, B.A. Primenenie funktsiy prinadlezhnosti v metode analiza ierarkhiy [Membership functions for analytic hierarchy process]. *Byulleten' nauki i praktiki. Elektronnyy zhurnal*, 2016, no. 4(5), pp. 99–107. <http://www.bulletennauki.com>.