

УДК 658.012

Решение задачи многокритериального выбора технической компоновки цифровой подстанции с помощью прямого метода анализа иерархии

А.Б. Гнатюк¹, Е.М. Вотякова², Б.А. Староверов²,

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет», г. Кострома, Российская Федерация
E-mail: abg-07@mail.ru; sba44@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В современных условиях значительно повысилась необходимость технического перевооружения управления эклектическими подстанциями. В связи с этим определение наилучшего компоновочного состава цифровых подстанций из предлагаемых различными производителями вариантов является актуальной задачей многокритериального выбора из имеющихся альтернатив. Для решения задач многокритериального выбора применяются методы экспертных оценок, сочетающие опыт, знания, интуицию лиц, принимающих решение, и современные технологии автоматизированной поддержки принятия решений. Более всего этим требованиям отвечает метод экспертных оценок – метод анализа иерархии. Однако этот метод имеет ряд недостатков: большая трудоемкость процедуры попарных оценок, возможность несогласованности отдельных оценок, неравномерная дискретность шкалы оценок.

Материалы и методы: Набор критериев сравнительной оценки альтернатив технической компоновки цифровой подстанции определен на основе анализа материалов в периодической печати. Решение задачи многокритериального выбора технической компоновки цифровой подстанции осуществлено с помощью модернизированного метода анализа иерархии.

Результаты: Предложен прямой метод анализа иерархии для многокритериального выбора технических решений, который делает возможным получать согласованные значения весовых коэффициентов сравниваемых показателей, критериев и альтернатив, не прибегая к формированию матрицы попарных сравнений, что значительно упрощает процедуру метода анализа иерархии.

Выводы: Прямой метод анализа иерархии для многокритериального выбора технических решений на основе имеющихся альтернатив дает следующие преимущества: значительно сокращается количество операций экспертных оценок; применяется линейная шкала оценок с малым шагом дискретности; обеспечивается лучшая согласованность экспертных оценок; появляется больше возможностей формировать наиболее сопоставимые группировки критериев и альтернатив; автоматически решается проблема оценки альтернатив по наращиваемому набору критериев.

Ключевые слова: цифровая подстанция, многокритериальный выбор, метод анализа иерархии, прямой метод, линейная шкала оценок, сопоставимые группировки критериев, наращиваемый набор критериев.

Solving multiple-criteria selection problems for choosing digital substation components by using direct analytic hierarchy process

A.B. Gnatyuk¹, E.M. Votyakova², B.A. Staroverov²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Kostroma State University of Technology, Kostroma, Russian Federation

E-mail: abg-07@mail.ru; sba44@mail.ru

Abstract

Background: Nowadays the necessity of technical upgrading of eclectic substations management has significantly increased. That is why selection of the best digital substation components among the available alternatives produced by different companies is a problem of multiple-criteria selection. Problems of multiple-criteria selection are solved by methods of expert evaluation combining experience, knowledge and intuition of the decision maker with modern technologies of automated decision support system. The most convenient method is the analytic hierarchy process (AHP). However, this method has a number of disadvantages: difficulty of pairwise comparisons, incoordination of separate evaluations, irregular sampling of the rate scale.

Materials and methods: The criteria of comparative evaluation of digital substation component alternatives were determined by analyzing periodical press materials. The problem of multiple-criteria selection of technical components of a digital substation was solved by the modernized analytic hierarchy process method.

Results: A direct analytic hierarchy process has been suggested to solve multiple-criteria selection problems. This simplifies the analytic hierarchy process by getting weights of the criteria and alternatives without pair-comparison matrix forming.

Conclusions: The advantages of the direct analytic hierarchy process as an instrument for multiple-criteria selection of engineering solutions are: fewer expert evaluations; using a straight-line scale with low discrete pitch size; better adjustment of evaluations; more abilities for forming more comparable criteria and alternative groups; automatic solution to the problem of alternatives evaluation by extensible set of criteria.

Key words: digital substation, multiple-criteria selection, analytic hierarchy process, direct method, linear scale of assessments, comparable criteria groups, extensible set of criteria.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.054-060

В современных условиях экономики значительно повысилась необходимость технического перевооружения электросетевых компаний. Особенно это относится к средствам автоматического контроля и управления электроподстанциями. Эти средства достаточно хорошо разработаны и используются с самого начала создания и развития сетей электроснабжения. Более того, эти средства постоянно улучшаются и модернизируются в связи с развитием науки и техники, превращаясь на современном этапе в комплексные решения, получившие название – цифровая подстанция.

Цифровая подстанция – это объект нового типа, представляет собой комплекс для управления энергосистемой, обеспечивает эффективное использование информации о процессах на подстанции, повышение согласованности действия различных видов оборудования. Она состоит из интеллектуального первичного и вторичного оборудования, объединенного в сеть для обеспечения информационного обмена и взаимодействия. Такая подстанция оснащается комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем релейной защиты и автоматики, учета электроэнергии, АСУ ТП, регистрации аварийных событий и т.д. [1, 2, 3].

Однако в силу ряда экономических и организационных причин образовался существенный разрыв между современными потребностями в автоматизированных системах контроля и управления и теми возможностями, которые предлагает рынок в виде достаточно широкого набора технических и программных средств, на основе которых можно создать системы с требуемыми характеристиками. В связи с этим возникает необходимость определения состава оборудования (задача компоновки) таким образом, чтобы оно отвечало существующим технологическим требованиям, российским и международным стандартам, ряду дополнительных условий при реализации конкретного проекта и критерию приемлемой стоимости. Эта проблема особенно остро стоит в условиях экономического кризиса и существующих на данный момент санкций, так как комплекующие цифровых подстанций первоначально представляли собой оборудование европейских фирм (Siemens, ABB и др.). В настоящее время осуществляется их импортозамещение на комплекующие российских и китайских производителей. Следовательно, определение наилучшего компоновочного состава цифровых подстанций из предлагаемых различными производителями вариантов является актуальной задачей.

Для решения задач многокритериального выбора наибольшее распространение получили методы, основанные на применении нечетких

множеств, векторной стратификации, теории полезности и др. В состав набора критериев сравнительной оценки альтернатив входят технические, эксплуатационные и экономические показатели. Свести эти показатели в одну систему и на основе ее сделать выбор наиболее эффективного технического решения является сложной, слабо формализованной задачей. Вследствие этого, широко применяются методы экспертных оценок, сочетающие опыт, знания, интуицию лица, принимающего решение, и современные технологии автоматизированной поддержки принятия решений. Более всего этим требованиям отвечает метод экспертных оценок – метод анализа иерархии (МАИ) [4, 5].

Основные этапы МАИ следующие:

- структуризация задачи в виде иерархии с несколькими уровнями: обобщающие критерии (требуемые показатели, характеристики, свойства); детализирующие критерии или параметры (может быть несколько уровней); сравниваемые альтернативы;
- попарное сравнение экспертами элементов каждого уровня на основе использования девятибалльной шкалы;
- вычисление коэффициентов веса (значимости) элементов каждого уровня;
- расчет результирующих показателей значимости (веса) каждой из альтернатив и их ранжирование по этим показателям.

Главным достоинством МАИ является наличие первого этапа, на котором производится декомпозиция сложной многокритериальной задачи выбора на систему значительно более простых, иерархически связанных между собой задач сравнения. Именно благодаря такому системному представлению задачи оценки альтернатив МАИ имеет значительные преимущества перед другими экспертными технологиями принятия решений. Этот этап является самым сложным, творческим и слабо формализуемым.

Следующие этапы МАИ являются достаточно формализованными. Именно их рассмотрению и посвящено большинство исследований, в которых, в основном, решаются задачи по уменьшению влияния ряда недостатков этого метода (большой трудоемкости процедуры попарных оценок; возможности несогласованности (противоречивости) отдельных оценок между собой; неравномерной дискретности шкалы оценок) на качество многокритериального выбора.

Ниже рассмотрен принципиально новый способ прямого метода анализа иерархии, позволяющий устранить эти недостатки.

На рис. 1 представлен фрагмент иерархии критериев, по которым осуществляется отбор альтернативных решений.

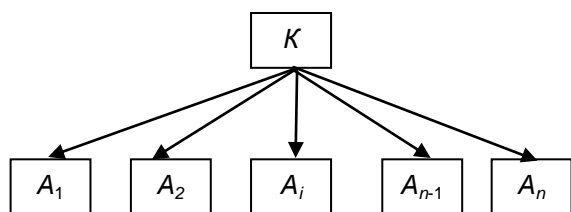


Рис. 1. Фрагмент иерархии критериев (показателей): K – критерий (показатель) предшествующего уровня; $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{n-1}, A_n$ – детализирующие критерии (показатели)

В соответствии с общепринятой методикой, детализирующие критерии попарно сравниваются между собой, и из численных значений величин относительной значимости этих критериев формируется матрица A попарных или парных сравнений:

$$A = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & A_i & A_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_i \\ A_n \end{matrix} & \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{i1} \\ a_{n1} \end{matrix} & \begin{matrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{i2} \\ a_{n2} \end{matrix} & \begin{matrix} a_{1i} \\ a_{2i} \\ a_{ii} \\ a_{ni} \end{matrix} & \begin{matrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ a_{in} \\ a_{nn} \end{matrix} \end{matrix}$$

Ее элементы a_{ij} определяются по следующим правилам: если критерий A_i имеет вес или значимость w_i , а критерий A_j – вес, равный w_j , в α раз больший или меньший, то

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} = \alpha, \tag{1}$$

где α – результат сравнения значимости критерия или показателя по девятибалльной шкале (1 – критерии или показатели равны по значимости, 3 – небольшое преимущество A_i перед A_j и т.д., 9 – подавляющее преимущество A_i перед A_j).

Из (1) очевидно следует, что

$$a_{ij} = \frac{w_j}{w_i} = \frac{1}{\alpha}. \tag{2}$$

Если оценки обоих критериев или показателей равны, то

$$a_{ij} = 1. \tag{3}$$

Кроме того, $a_{ii} = 1$, так как отношение значимости (веса) i -го критерия к самому себе равно 1. Следовательно, диагональные элементы матрицы A равны единице, а поддиагональные – обратным по величине соответствующим наддиагональным элементам.

После представления количественных суждений о парах (A_i, A_j) в числовом выражении через a_{ij} задача сводится к тому, чтобы определить множество числовых коэффициентов относительных весов w_1, w_2, \dots, w_n показателей или критериев A_1, A_2, \dots, A_n , которые соответствовали бы зафиксированным суждениям. Несложно доказать, что w_1, w_2, \dots, w_n являются составляющими максимального собственного вектора матрицы A .

Для формирования матрицы A размером $n \times n$ необходимо провести $\frac{n(n-1)}{2}$ попар-

ных сравнений критериев или показателей. Из этого следует, что общее количество попарных сравнений, которое необходимо провести для всей иерархии, значительно возрастает при увеличении n . Например, если $n = 3$, то количество необходимых сравнений равно тоже 3, если $n = 4$, то попарных сравнений необходимо уже 6, и т.д. Для иерархии древовидной структуры, имеющей r уровней, с одинаковыми коэффициентами ветвления, равными n , количество требуемых сравнений будет определяться выражением

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \frac{n^{r-1}-1}{n-1} = \frac{n(n^{r-1}-1)}{2}. \tag{4}$$

На нижнем уровне иерархии число показателей, по которым должны оцениваться альтернативы, составит

$$m = n^{r-1}.$$

Следовательно, если количество альтернатив равно d , то число попарных сравнений для оценки альтернатив будет определяться выражением

$$M = \frac{n^{r-1}(n^{r-1}-1)}{2} d. \tag{5}$$

Из (4) и (5) следует, что общее количество требуемых попарных сравнений составляет

$$K = M + N = \frac{n(n^{r-1}-1)}{2} (n^{r-2}d + 1). \tag{6}$$

Этим определяется большая трудоемкость процедуры попарных оценок. Например, при $r = 3, n = 3$ и $d = 3$ из (6) получается, что $K = 120$. Отсюда следует другая проблема, заключающаяся в том, что при большом количестве операций попарных сравнений неизбежно возникает несогласованность (противоречивость) в суждениях экспертов.

Строгая или кардинальная согласованность оценок между собой определяется очевидным соотношением:

$$a_{ik} a_{kj} = \frac{w_i}{w_k} \frac{w_k}{w_j} = a_{ij}. \tag{7}$$

Суждения экспертов в большинстве случаев не дают строгого соотношения (7), что может привести в итоге к некорректной оценке альтернатив. Для контроля непротиворечивости экспертных оценок Т.Саати [4] предложил использовать индекс согласованности каждой матрицы A :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \tag{8}$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы A .

Матрица A считается приемлемо согласованной, если выражение (8) дает значение индекса не более 0,1. Однако это положение строго не доказано. Численные эксперименты показывают, что соблюдение условия $CI \leq 0,1$ гарантирует лишь транзитивность оценок и не гарантирует допустимых количественных погрешностей в оценках. При несоблюдении условия согласованности требуется заново корректировать попарные оценки, что еще более увеличивает тру-

доемкость процесса. Поэтому такие корректировки часто сводятся к процессу числовых подгонок. Это порождает во многих случаях сомнения в правильности результатов, приводимых в различных публикациях.

Для устранения этого существенного недостатка МАИ ряд авторов предлагает ограничиться только $n - 1$ попарными сравнениями, составляющими первую строку матрицы **A** (сравнение «по образцу»), а остальные элементы получать, используя зависимость (7), расчетным путем [6, 7].

Графически такая процедура попарных сравнений представлена на рис. 2.

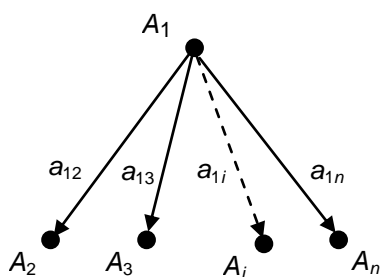


Рис. 2. Попарное сравнение «по образцу»

Очевидно, что согласованность матрицы в этом случае получается автоматически. Однако такая последовательность сравнения показателей или критериев не всегда эффективна. Например, необходимо сравнить такие показатели: «габариты», «масса», «полнота функциональных возможностей», «цена». Пары «габариты – цена» и «масса – цена» слабо коррелированы. Более уместным является парное сравнение «полнота функциональных возможностей – цена». Воспользуемся также методом наглядного графического представления (см. [6]) этой процедуры попарных сравнений в общем виде (рис. 3).

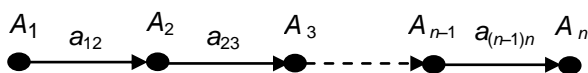


Рис. 3. Попарное последовательное сравнение

В случаях попарного сравнения «по образцу» или «по соседству» количество требуемых сравнений для определения весовых коэффициентов будет определяться выражением

$$N = (n - 1) \frac{n^{r-1} - 1}{n - 1} = n^{r-1} - 1. \quad (9)$$

Число попарных сравнений для оценки альтернатив, соответственно, будет равно

$$M = (n^{r-1} - 1)d. \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует, что общее количество требуемых попарных сравнений составляет

$$K = M + N = (n^{r-1} - 1)(d + 1). \quad (11)$$

Из сопоставления выражений (8) и (11) следует, что требуемое количество попарных сравнений значительно сокращается. Например, при $r = 3$, $n = 3$ и $d = 3$ из (11) получается, что

$K = 32$, т.е. почти в 4 раза меньше, чем при полном наборе попарных сравнений.

Определенным недостатком данного способа, по сравнению с полным набором попарных сравнений, является то, что эти сравнения осуществляются однократно. Это может привести к увеличению субъективных ошибок в оценках. Компромиссным решением является объединение попарных сравнений «по образцу» с последовательным сравнением (рис. 4).

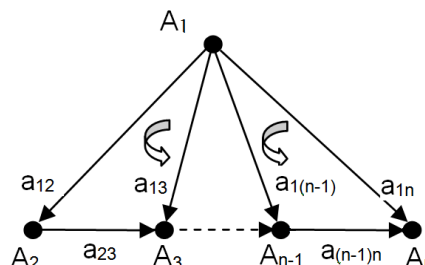


Рис. 4. Объединенное попарное сравнение «по соседству» и «по образцу»

В этом случае увеличение количества необходимых парных оценок происходит в 2 раза:

$$K = 2(n^{r-1} - 1)(d + 1), \quad (12)$$

что во многих случаях является вполне приемлемо, но при этом возникает проблема согласования парных оценок без использования матрицы **A**. Для этого необходимо использовать выражение (7). Однако оно является излишне радикальным. Необходимо ввести допуск на нечеткость экспертных оценок. Для этого представим данное соотношение в следующем виде

$$a_{ik} a_{kj} = a_{ij} \pm \epsilon. \quad (13)$$

Выражение (13) дает возможность определить допустимый интервал нечеткости оценок (суждений). Числовые примеры показывают, что при $\epsilon = 1$ нечеткость оценок является допустимой. При большем интервале нечеткости необходима коррекция одной из оценок. При этом итоговый контроль согласованности оценок можно проводить, используя индекс (8) матрицы **A**, сформированной с помощью соотношений (3) и (7) из попарных сравнений «по образцу» и/или «по соседству».

Однако остается ряд проблем, связанных с неравномерной дискретностью шкалы парных оценок, формированием наиболее сопоставимых для сравнения группировок критериев и альтернатив, оценкой альтернатив поэтапным наращиванием набора показателей и критериев.

Для наиболее простого случая, когда попарно оцениваются только два критерия или показателя, отношение (1), т.е.

$$a_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \alpha, \quad (14)$$

должно удовлетворять правилу нормализации:

$$w_1 + w_2 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} + \frac{1}{\alpha + 1} = 1 \quad (15)$$

или

$$w_1\% + w_2\% = 100. \tag{16}$$

Справедливость выражения (15) вытекает из (14).

Изменение на единицу парной оценки дает следующее изменение приращения коэффициента веса (значимости):

$$\Delta w_1 = w_1(\alpha) - w_1(\alpha + 1). \tag{17}$$

Из (17) следует, что недостатком используемой девятибалльной шкалы является, как уже отмечалось, ее дискретность, которая дает неравномерность в оценках соотношений (15) и (16). При малых величинах α это изменение максимально. Например, при $\alpha = 1$

$$\Delta w_1 = w_1(1) - w_1(1 + 1) = 0,5 - 0,666 = -0,166.$$

При больших величинах α (например, $\alpha = 8$) это изменение минимально:

$$\Delta w_1 = w_1(8) - w_1(8 + 1) = 0,888 - 0,9 = -0,012.$$

Поэтому целесообразно перейти от определения отношения значимости (весов) сравниваемых параметров к прямому определению соотношения (15) или (16). В этом случае шкала попарных сравнений заменяется на линейную шкалу парных соотношений. Как показывают исследования, психологически минимальный шаг такой шкалы составляет 0,05 или 5 %, хотя нет никаких ограничений на изменение величин оценок и с меньшим шагом, например в 1 %.

Цифровая шкала качественных экспертных парных оценок в соотношениях (15) и (16) приведена в таблице.

Цифровая шкала качественных экспертных парных оценок

Цифровая оценка парного соотношения A_1 и A_2		Определение
в частях	в %	
0,5; 0,5	50; 50	Одинаковая значимость (вес) показателей или критериев A_1 и A_2
0,6; 0,4	60; 40	Некоторое преобладание значимости (веса) параметра (критерия) A_1 по сравнению с A_2 (слабое превосходство)
0,7; 0,3	70; 30	Существенное или сильное преобладание значимости (веса) A_1 по сравнению с A_2
0,8; 0,2	80; 20	Очень сильная или очевидная значимость (весомость) A_1 по сравнению с A_2
0,9; 0,1	90; 10	Абсолютная значимость (весомость) A_1 по сравнению с A_2
0,55; 0,65; 0,95	55; 65; ...95	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы

Данная линейная шкала удобней в применении и дает значительно меньше отклонений в согласованности экспертных оценок.

Прямой метод оценок, основанный на использовании аддитивного соотношения значений весов, состоит в следующем. При сравнении «по образцу» n критериев A_1, A_2, \dots, A_n формируются

соотношения (15) или (16) с использованием линейной шкалы (см. таблицу)

$$\begin{aligned} w_1^{(1)} + w_2 &= 1; \\ \dots\dots\dots \\ w_1^{(i)} + w_{i+1} &= 1; \\ \dots\dots\dots \\ w_1^{(n-1)} + w_n &= 1. \end{aligned} \tag{18}$$

Из соотношений аддитивной оценки весовых коэффициентов (18) определяются переходные парные отношения весовых коэффициентов:

$$a_{12} = \frac{w_1^{(1)}}{w_2}; \quad a_{13} = \frac{w_1^{(2)}}{w_3}; \quad \dots \quad a_{1n} = \frac{w_1^{(n-1)}}{w_n}. \tag{19}$$

В соответствии с правилом нормализации, должно соблюдаться следующее равенство:

$$w_1^{(n)} + w_2^{(n)} + \dots + w_i^{(n)} + \dots + w_{n-1}^{(n)} + w_n^{(n)} = 1 \tag{20}$$

или

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

где, в соответствии с (2),

$$a_{21} = \frac{1}{a_{12}}; \quad \dots \quad a_{i1} = \frac{1}{a_{1i}}; \quad \dots \quad a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}}. \tag{22}$$

Из (21) и (22) следует, что

$$w_1^{(n)} = \frac{1}{1 + a_{21} + \dots + a_{i1} + \dots + a_{n1}}. \tag{23}$$

Остальные весовые коэффициенты определяются как

$$w_2^{(n)} = a_{21}w_1^{(n)}; \quad \dots \quad w_n^{(n)} = a_{n1}w_1^{(n)}. \tag{24}$$

При использовании сравнений «по соседству» формируются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} w_1^{(1)} + w_2 &= 1; \\ \dots\dots\dots \\ w_1^{(i)} + w_{i+1} &= 1; \\ \dots\dots\dots \\ w_1^{(n-1)} + w_n &= 1. \end{aligned} \tag{25}$$

Из аддитивного соотношения весовых коэффициентов (25) определяются следующие переходные парные отношения:

$$a_{21} = \frac{w_2}{w_1^{(1)}}; \quad a_{32} = \frac{w_3}{w_2^{(2)}}; \quad a_{n(n-1)} = \frac{w_n}{w_{n-1}^{(n-1)}}. \tag{26}$$

Используя зависимость (7), на следующем шаге вычисляются отношения «по образцу»:

$$a_{i1} = a_{i(i-1)} \cdot a_{(i-1)(i-2)} \cdot \dots \cdot a_{(i-n+2)(i-n+1)}, \tag{27}$$

где $i = 2, \dots, n$.

Далее с помощью выражений (23) и (24) определяются весовые коэффициенты.

Таким образом, пропорциональная шкала и выражения (18)–(27) дают возможность получать согласованные значения весовых коэффициентов сравниваемых показателей, критериев и альтернатив, не прибегая к формированию матрицы парных сравнений A , что значительно упрощает процедуру МАИ.

Данный прямой метод позволяет перейти к одновременному сравнению большего количества критериев или показателей. Наиболее эффективным является нахождение соотношения коэффициентов веса одновременно трех показателей или критериев:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1. \quad (28)$$

В этом случае набор возможных соотношений весовых коэффициентов значительно расширяется. Например, возможны соотношения $0,5 + 0,3 + 0,2 = 1$; $0,7 + 0,2 + 0,1 = 1$ и т.д.

Если количество критериев $n = 4$, то их одновременное сравнение становится психологически затруднительным. В этом случае выражение (28) дополняется экспертной оценкой парного соотношения:

$$w_1^{(1)} + w_4 = 1. \quad (29)$$

Объединение зависимостей (28) и (29) производится путем определения парного отношения:

$$a_{41} = \frac{w_4}{w_1^{(1)}}.$$

Затем используется выражение (23):

$$w_1^{(2)} = \frac{1}{1 + a_{11} + a_{21} + a_{31}},$$

а затем – выражение (24):

$$w_2^{(2)} = a_{21}w_1^{(2)}; \quad w_3^{(2)} = a_{31}w_1^{(2)}; \quad w_4^{(2)} = a_{41}w_1^{(2)}.$$

Аналогично осуществляется определение коэффициентов веса произвольного количества критериев или показателей путем их группировки на пересекающиеся соотношения вида (28) и (29). Например, при сравнении пяти параметров или критериев их можно сгруппировать в две пересекающиеся тройки:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad \text{и} \quad w_1^{(1)} + w_4 + w_5 = 1.$$

Дальнейшая процедура определения весовых коэффициентов производится рассмотренным выше способом.

Прямой метод МАИ автоматически решает проблему оценки динамических наборов альтернатив или критериев [6, 8].

Эта проблема связана с тем, что последовательность предпочтений, определенная на всем наборе критериев или альтернатив, может отличаться от последовательности предпочтений, определенной на части этих критериев или альтернатив. Поэтому, применяя предлагаемый метод, можно, например, сначала ранжировать альтернативы по техническим характеристикам, а на следующем этапе выбрать наилучший вариант исходя из капитальных и эксплуатационных затрат, т.е. поэтапно решить проблему выбора по критериям «цена–качество».

Заключение

Набор критериев сравнительной оценки альтернатив технической компоновки цифровой подстанции представляет многоуровневую иерархическую структуру, в которую входят техни-

ческие, эксплуатационные и экономические показатели, такие как возможность интеграции АСУ ТП подстанции; наличие функций мониторинга и управления режимами работы сети; обеспечение экономической целесообразности внедрения цифровой подстанции. Поэтому для выбора альтернатив наиболее подходит метод анализа иерархии.

Предлагаемый прямой метод анализа иерархии для многокритериального выбора технических решений на основе имеющихся альтернатив дает следующие преимущества:

- 1) значительно сокращается количество операций экспертных оценок весовых коэффициентов параметров, критериев и альтернатив;
- 2) применяется линейная шкала оценок с малым шагом дискретности;
- 3) обеспечивается лучшая согласованность экспертных оценок;
- 4) появляется больше возможностей для формирования наиболее удобных для сравнения группировок критериев и альтернатив;
- 5) решается проблема оценки динамических наборов альтернатив или критериев.

Список литературы

1. **Цифровая** подстанция [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.ru/> (дата обращения 20.12.2015).
2. **Многофункциональные**, многотарифные электронные счетчики электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosan.ru> (дата обращения 20.12.2015).
3. **Alstom** в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alstom.com> (дата обращения 20.12.2015).
4. **Саати Т.Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
5. **Староверов Б.А., Малков А.В.** Методика определения приоритетности функций АСКУЭ исходя из оценки рисков // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 4. – С. 92–94.
6. **Ногин В.Д.** Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2004. – Т. 44, №7. – С. 1261–1270.
7. **Трофимец В.Я.** К вопросу разработки вспомогательных вычислительных процедур метода анализа иерархий // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2004. – 79. – С. 864–872 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/079.pdf> (дата обращения 20.12.2015).
8. **Колесникова С.И.** Модификация метода анализа иерархии для динамических наборов альтернатив // Прикладная дискретная математика. – 2009. – № 4. – С. 102–109.

References

1. *Tsifrovaya podstantsiya* [Digital substation]. Available at: <http://digitalsubstation.ru/> (date: 20.12.2015).
2. *Mnogofunktsional'nye, mnogotarifnye elektronnye schetchiki elektroenergii* [Multifunctional, multi-tariff digital electricity meters [Electronic resource]]. Available at: <http://www.gosan.ru> (date 20.12.2015).
3. *Alstom v Rossii* [Alstom in Russia [Electronic resource]]. Available at: <http://www.alstom.com> (date 20.12.2015).
4. Saati, T.L. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhii* [Decision Making. Analytic Hierarchy Process]. Moscow, Radio i svyaz', 1993. 320 p.
5. Staroverov, B.A., Malkov, A.V. *Metodika opredeleniya prioritnosti funktsiy ASKUE iskhodya iz otsenki riskov* [A method of determining the priority of functions of the automatic system for commercial management of power consumption by risk assessment]. *Vestnik IGEU*, 2007, issue 4, pp. 92–94.

6. Nogin, V.D Uproshchenny variant metoda analiza ierarkhiy na osnove nelineynoy svertki kriteriev [A simplified variant of the analytic hierarchy process based on non-linear criteria fold]. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 2004, vol. 44, no. 7, pp. 1261–1270.

7. Trofimets, V.Ya. K voprosu razrabotki vspomogatel'nykh vychislitel'nykh protsedur metoda analiza ierarkhiy [On developing auxiliary calculation procedures of the analytic hierarchy process].

Elektronnyy zhurnal «Issledovano v Rossii», 2004, 79, pp. 864–872. Available at: <http://zhurnal.ape.relam.ru/articles/2004/079.pdf> (date 20.12.2015).

8. Kolesnikova, S.I. Modifikatsiya metoda analiza ierarkhii dlya dinamicheskikh naborov al'ternativ [A modification of the analytic hierarchy process for dynamic sets of alternatives]. *Prikladnaya diskretnaya matematika*, 2009, no. 4, pp. 102–109.

Гнатюк Анна Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры высокопроизводительных вычислительных систем,
e-mail: abg-07@mail.ru

Вотякова Елизавета Михайловна

ФГБОУВПО «Костромской государственный технологический университет»,
аспирант кафедры автоматизации и микропроцессорной техники,
e-mail: elzvtk@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.