

Вестник МИРБИС. 2021. № 4 (28): С. 99–110.

Vestnik MIRBIS. 2021; 4 (28): 99–110.

Научная статья

УДК 338.2:004

DOI: 10.25634/MIRBIS.2021.4.10

Разработка методологии и адаптивного инструментария многокритериальной оценки уровня готовности экономики к цифровой трансформации

Виктор Павлович Корнеенко¹, Владимир Федорович Уколов^{2,3}, Этсе Дадсон Гомадо^{2,4}

1 Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН), Москва, Россия. korn-vic@inbox.ru

2 Российский университет дружбы народов, Москва, Россия.

3 ukolovdom@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1233-7562>

4 dadfrango@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6261-9728>

Аннотация. Цифровизация все больше становится массовым явлением, поскольку использующие ее государства, компании и корпорации полагают, что она способствует рациональному решению стоящих перед ними экономических, социальных, технологических и политических задач развития. Массовость и высокая скорость данного явления подтверждается и глобальными трендами развития цифровизации, доминирующими во всех сферах жизнедеятельности. Однако, несмотря на это, влияние цифровизации на стратегию развития государства, универсальной методологии измерения эффекта от использования цифровых технологий, до сих пор не разработано. Нет единства мнений и о том, какую методологию применять для формирования и реализации цифровой политики государства, крупных компаний, корпораций и с помощью каких инструментов осуществлять управление ресурсами, необходимыми для выстраивания стратегических приоритетов решения задач экономической политики государства. Авторами предложен подход, базирующийся на методологии многокритериального оценивания и выбора.

Ключевые слова: политика цифровизации государства, методология многокритериального оценивания, альтернативные стратегии цифровизации, ресурсы цифровизации, эффект цифровизации.

Благодарности. Публикация подготовлена в рамках Программы стратегического академического лидерства РУДН. Исследование проведено и при финансовой поддержке РФФ, грант № 20-10-00137.

Для цитирования: Корнеенко В. П. Разработка методологии и адаптивного инструментария многокритериальной оценки уровня готовности экономики к цифровой трансформации / В. П. Корнеенко, В. Ф. Уколов, Е. Д. Гомадо. DOI: 10.25634/MIRBIS.2021.4.10 // Вестник МИРБИС. 2021; 4 (28): 99–110.

JEL: M15, M38

Original article

Development of methodology and adaptive tools for multi-criteria assessment of the level of readiness of the economy for digital transformation

Victor Pavlovich Korneenko⁵, Vladimir F. Ukolov^{6,7}, Etse Dadson Gomado^{6,8}

5 Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences, Moscow, Russia. korn-vic@inbox.ru

6 RUDN University, Moscow, Russia.

7 ukolovdom@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1233-7562>

8 dadfrango@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6261-9728>

Abstract. Digitalization is increasingly becoming a mass phenomenon, as States, companies and corporations using it believe that it contributes to the rational solution of the economic, social, technological and political development tasks facing them. The mass character and high speed of this phenomenon is also confirmed by global trends in the development of digitalization, dominating in all spheres of life. However, despite this, the impact of digitalization on the development strategy of the state, a universal methodology for measuring the effect of the use of digital technologies, has not yet been developed. There is also no consensus on what methodology to apply to the formation and implementation of the digital policy of the state, large companies, corporations and with the help of which tools to manage the resources necessary to build strategic priorities for solving the tasks of the economic

policy of the state. The authors propose an approach based on the methodology of multi-criteria assessment and selection.

Key words: state digitalization policy, multi-criteria assessment methodology, alternative digitalization strategies, digitalization resources, digitalization effect.

Acknowledgments. The publication was prepared within the framework of the RUDN University Strategic Academic Leadership Program. The study was also carried out with the financial support of the Russian Federation, grant no. 20-10-00137.

For citation: Korneenko V. P. Development of methodology and adaptive tools for multi-criteria assessment of the level of readiness of the economy for digital transformation. V. P. Korneenko, V. F. Ukolov, E. D. Gomado. DOI: 10.25634/MIRBIS.2021.4.10. *Vestnik MIRBIS*. 2021; 4 (28): 99–110. (In Russ.).

JEL: M15, M38

Введение

Цифровизация государств, их основных сфер жизнедеятельности и адаптация населения к осуществляемым переменам стала реальной необходимостью. Необходимо уметь встраиваться в изменяющийся мир для выживания и развития. К сожалению, до сих пор не существует стандартных предписанных процедур и процессов для экономической адаптации к цифровизации и реализации концепции развития. Кроме того, экономические ресурсы ограничены, что делает внедрение цифровизации сложным процессом для экономик многих стран.

Поэтому крайне важно понять и определить приоритеты конкретных потребностей экономики и сосредоточить имеющиеся ресурсы там, где будет ощущаться максимальное воздействие. При использовании ограниченных ресурсов важ-

но определить, какие цифровые программы и виды политики окажут максимальное влияние на экономику. В конечном счёте, процессы идентификации и выбора того или иного решения должны иметь научную основу и быть востребованными на практике. При выработке политики цифровизации необходимо определить весомость каждой программы и их наиболее оптимальное сочетание, чтобы более рационально использовать ресурсы. Это требует использования уникального метода для взвешивания доступных альтернативных стратегий.

В статье показано: как за период времени с 2010 г. по 2019 г. изменяется обобщённый показатель цифровой и экономической эффективности республики Гана, территориально находящейся в Западной Африке. При этом показано, что когда электрификация по всей стране расширяется, то уровень цифровой готовности и экономики страны увеличивается.

© Корнеев В. П., Уколов В. Ф., Гомадо Э. Д., 2021

Вестник МИРБИС, 2021, № 4 (28), с. 99–110.

1. Постановка задачи многокритериальной оценки цифровой и экономической эффективности регионов с многоуровневой структурой показателей во времени

Задачу многокритериальной оценки уровня готовности экономики к цифровой трансформации решим в соответствии с методологией многокритериального оценивания и выбора объектов с многоуровневой структурой [Корнеев 2018]. Постановку задачи нахождения обобщённых $y_{(j_1...j_k)}^{(1)}(t_k) = F_{(j_1...j_k)}(a_j(t_k))$ оценок цифровой и экономической эффективности регионов $a_j \in A$ на временных интервалах (месяц, квартал, год) $T = \{t_k : k = 1, 2, \dots, N\}$, в вершинах $F_{j_1...j_k}$ многоуровневой структуры критериев, фрагмент которой представлен на рисунке 1, в результирующей шкале и их упорядочения $a_{j_1} \geq a_{j_2} \geq \dots \geq a_{j_n}$ представим в виде:

$$F_0(F_{j_1}(F_{j_1 j_2} \dots (F_{j_1 \dots j_{n-1}}(f_{j_1 \dots j_n}(A)))))) \rightarrow \max(\min)_{a_{j_1} \geq a_{j_2} \geq \dots \geq a_{j_n}}$$

где F_0 — обобщённый показатель, являющийся корневой вершиной на верхнем уровне иерархии;

$F_{j_1...j_k}$ — обобщённый (групповой) показатель на k -ом уровне иерархии, являющийся подвершиной вершины $F_{j_1...j_{k-1}}$ ($k-1$ -го уровня, $k = \overline{1, n-1}$);

$f_{j_1...j_n}$ — концевой показатель на n -ом уровне иерархии.

$\max(\min)$ — указывает направление упорядочения (ранжирования) объектов по возрастающим (убывающим) величинам значений критериев иерархического дерева.

Под иерархическим деревом упорядоченных критериев понимается связный ориентированный граф без циклов с выделенной вершиной (корнем), в котором критерии более низкого уровня упорядочены по убыванию своей значимости и входят иерархически только в одну из вершин более высокого соседнего уровня.

В определении иерархического дерева входит понятие важности критериев. С позиций теории измерений важность критериев может быть измерена в любом из основных типов шкал [Пфанцagl 1976]. Понятие количественной важности критериев соответствует измерению в количественных типах шкал: отношений, разности и абсолютной шкале.

Пусть $F = \{f_j : j = \overline{1, m}\}$ — множество конечных критериев.

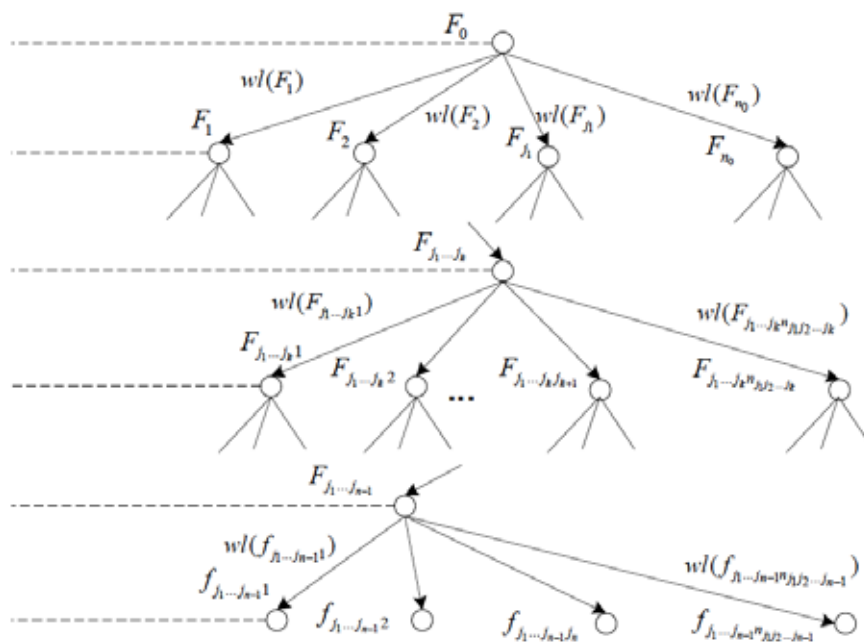


Рис. 1. Фрагмент многоуровневого дерева упорядоченных критериев с учётом весов важности

Источник: составлено по [Корнеев 2018, 39]

В шкале отношений критерий f_j будет более важным, чем критерий f_q , если количественный вес $w_j = w(f_j)$ критерия f_j будет превосходить количественный вес $w_q = w(f_q)$ критерия f_q в $w_{jq} = \frac{w_j}{w_q} > 1$ раз,

что представим в виде $f_j > f_q \Leftrightarrow w(f_j) > w(f_q)$. И наоборот, менее важен, если

$w_{jq} = \frac{w_j}{w_q} < 1$, т.е. $f_j > f_q \Leftrightarrow w(f_j) < w(f_q)$, а при $w_{jq} = \frac{w_j}{w_q} = 1$, т.е. равенстве весов критерии равно-

важны: $f_j \approx f_q \Leftrightarrow w(f_j) = w(f_q)$, где $w(f_j) > 0, f_j \in F$.

Важность групповых критериев в иерархических структурах, зависит как от линейно-аддитивных, так и нелинейно-мультипликативных механизмов агрегирования, определяющих вклад отдельных критериев в обобщённый критерий.

Дадим количественное определение важности групповых критериев $F_{j1...jk}$ на k -м уровне иерархической структуры (рис. 1), исходя из требования, что подкритерии $F_{j1...jk}$ низшего k -го уровня иерархической структуры, входящие в вершины $F_{j1...jk-1}$ критериев более высокого $(k - 1)$ -го уровня, должны пропорционально вносить вклад в корневую F_0 вершину нулевого уровня, $k = n - 1, \dots, 0$.

Пусть $w_{j1...jk} = w(F_{j1...jk})$, где $w_{j1...jk} > 0$, количественные значения важности $F_{j1...jk}$ подкритериев k -го уровня, входящие в вершину $F_{j1...jk-1}$ критерия $(k - 1)$ -го уровня.

Тогда за количественный вес важности $F_{j1...jk-1}$ критерия на $(k - 1)$ -м уровне примем сумму весов важности подкритериев k -го уровня:

$$w(F_{j1...jk-1}) = \sum_{j_k=1}^{n_{j1...jk-1}} w(F_{j1...jk}),$$

где $n_{j_1 \dots j_{k-1}}$ — число подкритериев $F_{j_1 \dots j_k}$ k -го уровня, входящие в вершину $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$ критерия $(k - 1)$ -го уровня.

Количественный вес важности $F_{j_1 \dots j_{n-1}}$ группового критерия на $(n - 1)$ -м уровне есть сумма весов важности концевых $f_{j_1 \dots j_n}$ подкритериев n -го (нижнего) уровня:

$$w(F_{j_1 \dots j_{n-1}}) = \sum_{j_n=1}^{n_{j_1 \dots j_{n-1}}} w(f_{j_1 \dots j_n}),$$

где $n_{j_1 \dots j_{n-1}}$ — число подкритериев $f_{j_1 \dots j_n}$ n -го уровня, входящих в вершину $F_{j_1 \dots j_{n-1}}$ критерия n -го уровня.

Количественный вес важности критерия $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$ на $(k - 1)$ -м уровня, вычисляемый по формуле (1), можно определить через сумму весов важности концевых критериев n -го уровня, для которых вершина $F_{j_1 \dots j_{k-1}}$ будет корневой:

$$w(F_{j_1 \dots j_{k-1}}) = \sum_{j_k=1}^{n_{j_1 \dots j_{k-1}}} \dots \sum_{j_{n-1}=1}^{n_{j_1 \dots j_{n-2}}} \sum_{j_n=1}^{n_{j_1 \dots j_{n-1}}} w(f_{j_1 \dots j_n}),$$

а количественный вес важности F_0 корневого критерия на высшем уровне иерархического дерева упорядоченных критериев будет равен сумме всех концевых критериев нижнего уровня:

$$w(F_0) = \sum_{j_1=1}^{n_0} \sum_{j_2=1}^{n_{j_1}} \dots \sum_{j_{n-1}=1}^{n_{j_1 \dots j_{n-2}}} \sum_{j_n=1}^{n_{j_1 \dots j_{n-1}}} w(f_{j_1 \dots j_n}).$$

Агрегирование оценок по глобальному критерию выполняется, как правило, несколькими механизмами агрегирования. В зависимости от постановки многокритериальной задачи оценивания, можно рекомендовать следующие механизмы агрегирования: интегрально-локальные методы агрегирования оценок вариантов с иерархической структурой критериев:

- эталонные методы агрегирования и оценивания вариантов в вершинах иерархического дерева;
- продукционные методы агрегирования и оценивания вариантов в вершинах иерархического дерева.

Результатом данного этапа методологии являются обобщённые оценки вариантов по упорядоченным критериям качества и эффективности в вершинах иерархического дерева.

В случае, если обобщённые (агрегированные) оценки вариантов представлены в порядковой (балльной) канонической шкале, то они сравнимы в шкале разности, а если в количественной, то в шкале отношений.

2. Этапы методологии многокритериального оценивания

Этап 1. Формализация (моделирование) предметной области оцениваемых объектов. Результатом моделирования является комплекс моделей: структурно-функциональные модели (деятельности), информационно-потокковые, экономико-математические, включающие систему показателей и ограничения (ресурсные, денежные, логические, временные и др.).

Этап 2. Постановка поэтапно решаемых подзадач многокритериального оценивания объектов на комплексе моделей выбора.

В соответствии с декомпозицией, постановка задачи многокритериального оценивания качества и эффективности объектов включает в себя математическую постановку подзадач на соответствующих формализованных моделях выбора с мультипредпочтением, а именно: выбора метода формирования количественных весов важности критериев, метода построения шкал измерения и оценивания объектов в результирующих шкалах, выбора механизмов агрегирования и др. изменения исходных данных (пределов их изменения).

Этап 3. Разработка многоуровневой иерархической структуры критериев оценки эффективности объектов и их упорядочение по убыванию важности. Результатом данного этапа является иерархическое дерево показателей, упорядоченных по убыванию важности (значимости) на каждом уровне иерархии.

Этап 4. Экспертное оценивание критериев по предпочтительности в шкале отношений и формирование локальных и глобальных весов критериев иерархического дерева. Результатом данного этапа являются локальные и глобальные коэффициенты важности критериев на каждом уровне иерархии.

Этап 5. Измерение объектов в исходных шкалах по концевым вершинам иерархического дерева упорядоченных критериев. Результатом этапа являются оценки объектов в качественных и количественных шкалах по частным показателям (критериям).

Этап 6. Построение результирующих шкал для оценок объектов на разных уровнях иерархического дерева упорядоченных критериев. Результатом этапа являются оценки объектов в результирующих шкалах по упорядоченным критериям качества и эффективности в вершинах иерархического дерева.

Этап 7. Построение обобщённых оценок объектов в вершинах многоуровневой структуры критериев и их упорядочение. Результатом данного этапа являются обобщённые оценки объектов в результирующих одноступенчатых шкалах по частным показателям.

Этап 8. Метаагрегирование и анализ устойчивости результатов многокритериального выбора при варьировании исходных данных. На данном этапе исследуется устойчивость результатов многокритериального оценивания, а в результате метаагрегирования приходим к окончательному результату.

На этапе экспертного оценивания критериев в шкале отношений по исходной экспертной матрице суждений в многокритериальных задачах выбора оптимизационный метод аппроксимационной матрицы формирования количественных весов объектов (важности критериев, приоритетов альтернатив) становится подходящим инструментом [Корнеев 2021].

Метод аппроксимационной матрицы является эффективным методом анализа иерархий (МАИ) Т. Саати [Saaty 1986; Саати 2008] по критерию близости к исходной матрице суждений мультипликативных матриц, элементы которых восстановлены по найденным нормированным элементам весов объектов. по критерию близости к исходной матрице суждений мультипликативных матриц, элементы которых восстановлены по найденным нормированным элементам весов объектов.

Поскольку матрицу парных сравнений можно рассматривать как некоторое возмущение мультипликативной матрицы, то метод аппроксимационной матрицы базируется на аппроксимации исходной матрицы парных сравнений мультипликативной матрицей по матричному критерию минимума расстояний между матрицами.

В оптимизационном методе аппроксимационной матрицы (ММ) весов объектов в многокритериальных задачах в качестве целевого показателя задачи аппроксимации выступает квадрат разности между нормированными элементами исходной $V = [v_{ij}]$ и аппроксимационной мультипликативной матрицами $W = [w_{ij}]$ в виде:

$$\rho(V, W) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\tilde{v}_{ij} - \tilde{w}_{ij})^2, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где $\tilde{v}_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{i=1}^n v_{ij}}$ — нормированные элементы матрицы $V = [v_{ij}]$ суждений;

$\tilde{w}_{ij} = \tilde{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{k=1}^n w_k}$ — нормированные элементы любого столбца аппроксимационной матрицы, которые

совпадают с нормированными элементами правого собственного вектора мультипликативной матрицы [Корнеев 2021].

Решением задачи является оптимальная аппроксимационная матрица $W_* = [w_{ij}^*]$, элементы которой определяются по формуле:

$$w_{ij}^* = \frac{\tilde{w}_i^*}{\tilde{w}_j^*}, \quad \text{где } \tilde{w}_i^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij}, \quad \forall i = \overline{1, n},$$

доставляя при этом минимум показателю (2). Для сравнения эффективности методов применяется матричная евклидова l_2 -норма [Хорн 1989] между исходной возмущенной $V = [v_{ij}]$ матрицей суждений и аппроксимационной мультипликативной $W = [w_{ij}]$ матрицей [Корнеев 2021]:

$$d(V, W) = \|V - W\|_E = \sqrt{\sum_{i,j=1}^n \left(v_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right)^2}$$

В качестве мультипликативных матриц выступают квадратные матрицы W_S и W_* , в которых элементы определяются по вектору приоритетов, найденных по МАИ и по ММ:

$$W_{\text{МАН}}^{\approx} = \left(\frac{\hat{w}_i}{\hat{w}_j} \right)_{i,j=1,n.}; W_{\text{МАН}}^{*} = \left(\frac{\hat{w}_i^{*}}{\hat{w}_j^{*}} \right)_{i,j=1,n.}.$$

3. Пример решения задачи оценки цифровой и экономической эффективности

3.1. Показатели цифровой и экономической готовности страны Гана

В этом исследовании цифровая и экономическая эффективность рассматривается в качестве глобального (обобщённого) показателя, который является корневой вершиной трёхуровневого иерархического дерева важности критериев.

В качестве групповых критериев выступают:

- уровень цифровой готовности страны,
- финансово-экономический потенциал и трудовой потенциал.

В качестве исходных и являющихся концевыми вершинами иерархического дерева выступают критерии, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Показатели цифровой и экономической эффективности

П.1.	Уровень электрификации в сельской местности (% сельского населения)
П.2.	Защищённые интернет-серверы
П.3.	Физические лица, пользующиеся Интернетом (% населения)
П.4.	Число абонентов сотовой связи (на 100 человек)
П.5.	Экспорт высоких технологий (в текущих тыс. долларах США)
П.6.	Гранты и прочие доходы (текущий LCU, в тыс. долларах США)
П.7.	Налоговые поступления (текущий LCU, в тыс. долларах США)
П.8.	ВНД (постоянный млн. долл. США)
П.9.	Производство, добавленная стоимость (в текущих тыс. долларах США)
П.10.	Добавленная стоимость (постоянный LCU)
П.11.	Занятость в сфере услуг (% от общей занятости) (смоделированная оценка МОТ)
П.12.	Услуги (% ВВП)

Источник: значения отобраны авторами

Исходные количественные данные мирового банка по африканской стране Гана за десять лет с 2010 по 2019 года по показателям табл. 1 представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные с 2010 г. по 2019 г.

№	2010	2011	2012	2013	2014
П.1.	55,35	41,97	23,64	50,82	63,96
П.2.	22	33	70	113	148
П.3.	7,8	9	10,6	15	19
П.4.	70	83	98	105	111
П.5.	9246468	23761633	76336097	62421497	144096432
П.6.	2694558161	3964114967	4151160279	5163900980	9054408123
П.7.	6164294730	8892168867	11574601668	13284043685	17004655173
П.8.	31663124545	35577762206	38038350770	41833454455	44429405126
П.9.	2056973846	2526936999	2336178092	7280278255	6037041694
П.10.	35896204900	39261106300	44004283200	50523645539	53154195360
П.11.	35,98	37,65	39,15	40,55	43,39
П.12.	13,91	13,98	14,00	14,07	16,20

Продолжение таблицы 2.

№	2015	2016	2017	2018	2019
П.1.	57,84	66,59	65,33	68,27	70,01

№	2015	2016	2017	2018	2019
П.2.	200	2761	2744	649	1369
П.3.	23	28	37,88	43	53
П.4.	125	134	126	137	134
П.5.	89425067	21056625	41531749	50006668	9928827
П.6.	17298401821	7949508149	8829826108	9475241153	10451754525
П.7.	32944748220	24283493247	30424202730	37784185990	42927855572
П.8.	45579882637	46271333881	49281858907	52789368753	55631887093
П.9.	5483288993	6077310247	6132590699	6810777024	6943926602
П.10.	54682740363	56191069603	58127919006	59761371488	64316771412
П.11.	46,14	46,98	47,81	48,48	49,21
П.12.	18,69	19,13	19,62	20,47	21,05

Источник: таблица составлена авторами по данным сайта *The word bank*. Доступ свободный. URL: <https://data.worldbank.org/country/ghana?view=chart> (дата обращения 18.08.2021)

3.2. Построение иерархического дерева важности критериев цифровой и экономической эффективности республики Гана

Пусть экспертами показатели характеризующих эффективность экономической деятельности страны, сгруппированы в три группы и представлены в виде следующей упорядоченной иерархии:

$$F_0: F_1 > \{F_2 \approx F_3\}; \tag{3}$$

$$F_1: f_{11} > \{f_{12} \approx f_{13} \approx f_{14} \approx f_{15} \approx f_{16} \approx f_{17}\}; \tag{4}$$

$$F_2: \{f_{21} \approx f_{22}\} > f_{23} > f_{24}; \tag{5}$$

$$F_3: f_{31} > \{f_{32} \approx f_{33}\} > f_{34} > f_{35} > f_{36} > f_{37}; \tag{6}$$

где F_0 — обобщённый показатель цифровой и экономической готовности страны (корневая вершина);

F_1 — групповой показатель, характеризующий уровень цифровой трансформации, включающий показатели П.1.÷П.4, служащие в качестве критериев $f_{11} \div f_{14}$;

F_2 — групповой показатель, характеризующий финансовую и экономическую эффективность страны, где критерий f_{21} характеризует финансовые возможности страны и объединяет частные показатели П.5.÷П.7; f_{22} характеризует экономическую эффективность страны и объединяет частные показатели П.8.÷П.10;

F_3 — групповой показатель, характеризующий трудовой потенциал страны, включающий показатели П.11, П.12, служащие в качестве критериев f_{31}, f_{32} .

Обозначения критериев и соответствующих им показателей представлены в таблице 3,

Таблица 3. Иерархия показателей, выбранных в качестве критериев

Обозначения		Показатели, выбранные в качестве критериев	
F_0	F_1	f_{11}	П.1.
		f_{12}	П.2.
		f_{13}	П.3.
		f_{14}	П.4.
	F_2	f_{21}	П.5.+ П.6.+ П.7.
		f_{22}	П.8.+ П.9.+ П.10.
	F_3	f_{31}	П.11.
		f_{32}	П.12.

Источник: таблица разработана авторами

Обобщённые числовые данные по критериям таблицы 3 представлены в таблице 4.

Иерархическое 3-х уровневое дерево важности критериев, упорядоченных по убыванию значимости, представлено на рисунке 1.

Таблица 4. Обобщённые данные по критериям с 2010 г. по 2019 г.

№	2010	2011	2012	2013	2014
f_{11}	55,35	41,97	23,64	50,82	63,96
f_{12}	22	33	70	113	148
f_{13}	7,8	9	10,6	15	19
f_{14}	70	83	98	105	111
f_{21}	8868099359	12880045467	15802098044	18510366162	26203159728
f_{22}	69616303291	77365805505	84378812062	99637378249	103620642180
f_{31}	6164294730	8892168867	11574601668	13284043685	17004655173
f_{32}	31663124545	35577762206	38038350770	41833454455	44429405126

Продолжение таблицы 4.

№	2015	2016	2017	2018	2019
f_{11}	57,84	66,59	65,33	68,27	70,01
f_{12}	200	2761	2744	649	1369
f_{13}	23	28	37,88	43	53
f_{14}	125	134	126	137	134
f_{21}	50332575108	32254058021	39295560587	47309433811	53389538924
f_{22}	105745911993	108539713731	113542368612	119361517265	126892585107
f_{31}	32944748220	24283493247	30424202730	37784185990	42927855572
f_{32}	45579882637	46271333881	49281858907	52789368753	55631887093

Источник: таблица разработана и рассчитана авторами



Рис. 1. Фрагмент многоуровневого дерева упорядоченных критериев с учётом весов важности

Источник: рисунок авторов

3.3. Экспертное оценивание и формирование локальных и глобальных коэффициентов важности показателей

Пусть с учётом упорядочений (3) экспертами установлены следующие количественные степени превосходства в важности между смежными упорядоченными критериями, входящие в корневую вершину F_0 :

$$b_{12} = \frac{w(F_1)}{w(F_2)} = \frac{5}{3}; b_{23} = \frac{w(F_2)}{w(F_3)} = \frac{3}{2}. \tag{7}$$

Рассматривая экспертные оценки b_{12} и b_{23} предпочтительности смежных критериев в виде наддиагональных элементов B_{\dots} мультипликативной матрицы, вычислим элемент b_{13} , а именно:

$$b_{13} = b_{12} \times b_{23} = \frac{5}{3} \times \frac{3}{2} = \frac{5}{2}. \tag{8}$$

Остальные элементы вычисляются аналогичным образом. Мультипликативная матрица примет вид:

$$B_{F_0} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{5^*}{3} & \frac{5}{2} \\ \frac{3}{5} & 1 & \frac{3^*}{2} \\ \frac{2}{5} & \frac{2}{3} & 1 \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Элементы по нормированного последнего столбца $\vec{b}_3 = (\frac{5}{3} \frac{3^*}{3} 1)^T$ матрицы B_{F_0} примем за локальные веса на первом уровне иерархии: $wl(F_1) = 0,5; wl(F_2) = 0,3; wl(F_3) = 0,2.$ (10)

Аналогично находим локальные веса на втором уровне иерархии для концевых критериев, входящих в вершины F_1 (4), F_2 (6) и F_3 (7):

$$F_1: wl(f_{11}) = 0,4; wl(f_{12}) = 0,3; wl(f_{13}) = 0,2; wl(f_{14}) = 0,1;$$

$$F_2: wl(f_{21}) = 0,6; wl(f_{22}) = 0,4; F_3: wl(f_{31}) = 0,5; wl(f_{32}) = 0,5.$$

Глобальные веса концевых критериев находим произведением локальных «весов» вершин, лежащих на пути от корневой вершины F_0 к произвольной концевой вершине:

$$wg(f_{11}) = 0,2; wg(f_{12}) = 0,15; wg(f_{13}) = 0,10; wg(f_{14}) = 0,05;$$

$$wg(f_{21}) = 0,18; wg(f_{22}) = 0,12; wg(f_{31}) = 0,10; wg(f_{32}) = 0,10.$$

Легко убедиться, что сумма глобальных весов равна единице.

3.4. Построение результирующих шкал для концевых критериев иерархического дерева

Для того, чтобы критерии при построении обобщённых оценок объектов отвечали требованию однородности, т. е. имели общую шкалу, каждая градация которой отражает одинаковый уровень предпочтений для каждого оцениваемого объекта, необходимо перейти к результирующей канонической балльной или нормированной шкале.

Переход от исходных оценок $f_{ij}^{(t_k)} = f_{ij}(t_k)$ в концевых вершинах в результирующую 100 балльную шкалу с шагом дискретизации, например, для $f_{11}(t_k)$: $h_{11} = \frac{f_{11}^* - f_{11}^*}{N} = \frac{70,01 - 23,64}{100} = 0,4637,$

описывается правилом перехода — множественно-точечным отображением:

$$\pi: [f_{11}^* + (r - 1)h_{11}, f_{11}^* + rh_{11}] \rightarrow r, \tag{11}$$

где $f_{11}^* = \min_{t_k \in T} f_{11}(t_k) = 23,64; f_{11}^* = \max_{t_k \in T} f_{11}(t_k) = 70,01;$

$$X_{11}(t_k) = [f_{11}^* + (r - 1)h_{11}, f_{11}^* + rh_{11}], r = 1, 2, \dots, 100,$$

$$t_k \in T = \{2010 \div 2019\}, k = 0, 1, 2, \dots, 19.$$

Таким образом, если $f_{ij}(t_k) \in X_{ij}(t_k)$, то $f_{ij}^{(t_k)} \xrightarrow{\pi} r_{ij}^{(t_k)}$.

Вычисленные шаги дискретизации для каждого критерия представлены в таблице 5.

Таблица 5. Шаги дискретизации концевых критериев

Критерии		Максимальное значение	Минимальное значение	Размах критерия	Шаг дискретизации	
F_0	F_1	f_{11}	70,01	23,64	46,37	0,46
		f_{12}	2761,00	22,00	2739,00	27,39
		f_{13}	53,00	7,80	45,20	0,45
		f_{14}	137,00	70,00	67,00	0,67
	F_2	f_{21}	53389538924	8868099359	44521439565	445214395,65
		f_{22}	126892585107	69616303291	57276281816	572762818,16

Критерии		Максимальное значение	Минимальное значение	Размах критерия	Шаг дискретизации
F_3	f_{31}	49,21	35,98	13,23	0,13
	f_{32}	21,05	13,91	7,14	0,07

Источник: таблица разработана авторами

Балльные оценки при равномерном разбиении исходных областей критериев представлены в таблице 6.

Таблица 6. Оценки страны Гана в 100 балльной шкале

f_{ij}/t_k	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
f_{11}	69	40	1	59	87	74	94	90	97	100
f_{12}	1	1	2	4	5	7	100	100	23	50
f_{13}	1	3	7	16	25	34	45	67	78	100
f_{14}	1	20	42	53	62	83	96	84	100	96
f_{21}	1	10	16	22	39	94	53	69	87	100
f_{22}	1	14	26	53	60	63	72	77	87	100
f_{31}	1	13	24	35	56	77	84	90	96	100
f_{32}	1	1	2	3	30	68	74	80	92	100

Источник: таблица разработана авторами

В таблице 7 представлены оценки страны с учётом глобальных весов критериев в количественной шкале измерения.

Таблица 7. Оценки страны в количественной шкале измерения

f_{ij}/t_k	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
f_{11}	13,80	8,00	0,20	11,80	17,40	14,80	18,80	18,00	19,40	20,00
f_{12}	0,15	0,15	0,30	0,60	0,75	1,05	15,00	15,00	3,45	7,50
f_{13}	0,10	0,30	0,70	1,60	2,50	3,40	4,50	6,70	7,80	10,00
f_{14}	0,05	1,00	2,10	2,65	3,10	4,15	4,80	4,20	5,00	4,80
f_{21}	0,18	1,80	2,88	3,96	7,02	16,92	9,54	12,42	15,66	18,00
f_{22}	0,12	1,68	3,12	6,36	7,20	7,56	8,64	9,24	10,44	12,00
f_{31}	0,10	1,30	2,40	3,50	5,60	7,70	8,40	9,00	9,60	10,00
f_{32}	0,10	0,10	0,20	0,30	3,00	6,80	7,40	8,00	9,20	10,00

Источник: таблица разработана авторами

3.5. Вычисление обобщённых оценок интегральным аддитивным механизмом агрегирования без учёта и с учётом локальных весов критериев

Поскольку оценки страны в таблице 7, представленные в результирующей шкале, принимают значения по критериям, имеющим одинаковый размах, максимальные и минимальные значения, то выполняются условия корректности аддитивного механизма агрегирования оценок объектов в единой шкале.

Обобщённые оценки, без учёта весов и с учётом весов важности критериев, находим в соответствии с алгоритмом аддитивного агрегирования, по формуле:

$$y_{\Sigma}^{(t_k)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{m_i} f_{ij}^{(t_k)}, \quad y_{\Sigma}^{(t_k)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{m_i} wg_{ij} \cdot f_{ij}^{(t_k)}, \quad \forall t_k = \overline{0, 9}, \quad (12)$$

где $f_{ij}^{(t_k)}$ — оценки страны в 100 балльной результирующей шкале по конечным критериям в t_k году

wg_{ij} — глобальные веса конечных критериев.

Результаты агрегирования, без учёта и с учётом весов важности критериев, представлены в таблице 8.

Таблица 8. Результаты агрегирования без весов и с весами важности критериев

Год	Интегральный метод агрегирования без учёта весов важности		Интегральный метод агрегирования с учётом весов важности		Метаагрегирование
	Результаты агрегирования, $y_{\Sigma}^{(t_k)}$	Оценки объектов в 100 балльной шкале, $r_{\Sigma}^{(t_k)}$	Результаты агрегирования, $y_{\Sigma}^{(t_k)}$	Оценки объектов в 100 балльной шкале, $r_{\Sigma}^{(t_k)}$	Оценки объектов в 100 балльной шкале, $r_{\Sigma}^{(t_k)}$
2010	76	1	14,60	4	3
2011	102	4	14,33	4	4
2012	120	7	11,90	1	4
2013	245	26	30,77	24	25
2014	364	43	46,57	44	44
2015	500	64	62,38	62	63
2016	618	82	77,08	82	82
2017	657	87	82,56	88	88
2018	660	88	80,55	86	87
2019	746	100	92,30	100	100

Источник: таблица разработана авторами

Наглядно изменение обобщённой оценки цифровой и экономической эффективности представлено на рисунке 2. Из таблицы 8 и рисунка 2 можно сделать следующий вывод: за период с 2010 по 2019 гг. наблюдается положительный тренд по обобщённому показателю цифровой и экономической эффективности, который коррелирует с линейным трендом электрификации сельских районов республики Гана (см. рисунок 3). При этом максимальный уровень приходится на 2019 год.

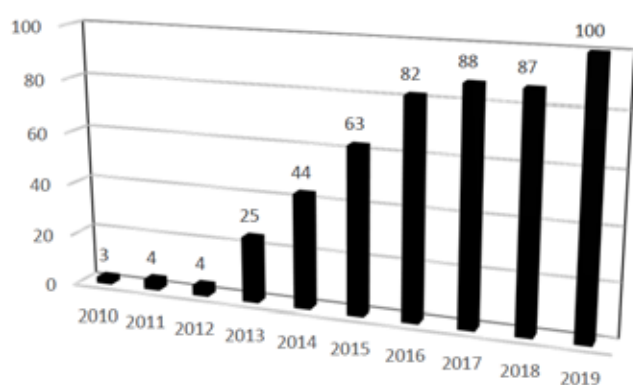


Рис. 2. Сравнение цифровой готовности по годам

Источник: рисунок авторов

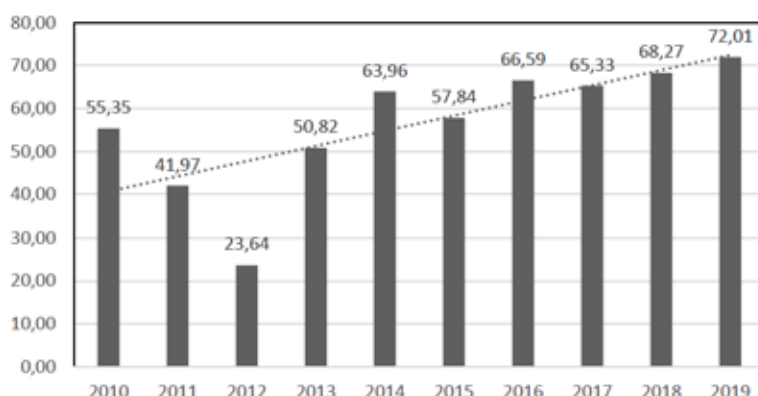


Рис. 3. Уровень электрификации в сельской местности Ганы, %

Источник: рисунок авторов

4. Заключение

Среди показателей оценки, доступ к электричеству занимает наиболее важное место, отражающее реальность. Кроме того, при сравнении временных рядов динамика цифровизации продолжала улучшаться, и в период с 2010 по

2019 год, в 2019 году наблюдалось значительное улучшение. Поэтому можно с уверенностью сделать вывод, что, когда электрификация будет усилена по всей стране, вероятность достижения большей цифровизации экономики будет выше.

Список источников

1. Корнеенко 2018 — Корнеенко В. П. Методы многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей эффективности. Москва : Макс Пресс, 2018. 296 с. ISBN 978-5-317-05913-2.
2. Корнеенко 2021 — Корнеенко В. П. Метод аппроксимационной матрицы формирования весов объектов в многокритериальных задачах выбора. DOI 10.34822/1999-7604-2021-1-51-62 // Вестник кибернетики. 2021; 1: 51–62.

3. Пфанцагль 1976 — Пфанцагль И. Теория измерения. Москва : Мир, 1976. 248 с.
4. Саати 2008 — Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях : аналитические сети. Москва : ЛКИ, 2008. 360 с.
5. Хорн 1989 — Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. Москва : Мир, 1989. 655 с. ISBN 5-03-001042-4, 0-521-30586-1.
6. Saaty 1986 — Saaty T. L. Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. DOI 10.1287/mnsc.32.7.841 // Management Scienc. 1986; 32(7): 841–855.

References

1. Korneenko V. P. *Metody mnogokriterial'nogo otsenivaniya ob"yektov s mnogourovnevnoy strukturoy pokazateley effektivnosti* [Methods of multicriteria assessment of objects with a multilevel structure of performance indicators]. Moscow : Max Press Publ., 2018. 296 p. ISBN 978-5-317-05913-2 (in Russ.).
2. Korneenko V. P. Metod approksimatsionnoy matritsy formirovaniya vesov ob"yektov v mnogokriterial'nykh zadachakh vybora [The method of the approximation matrix for the formation of weights of objects in multicriteria selection problems]. DOI 10.34822/1999-7604-2021-1-51-62. *Vestnik kibernetiki*. 2021; 1: 51–62 (in Russ.).
3. Pfantsagl I. *Teoriya izmereniya* [Measurement theory]. Moscow : Mir Publ., 1976. 248 p. (in Russ.).
4. Saaty T. Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazey : analiticheskiye seti [Decision Making with Dependencies and Feedbacks : Analytical Networks]. Moscow : LKI Publ., 2008. 360 p. (in Russ.).
5. Horn R., Johnson C. *Matrichnyy analiz* [Matrix Analysis]. Moscow: Mir Publ., 1989. 655 p. ISBN 5-03-001042-4, 0-521-30586-1 (in Russ.).
6. Saaty T. L. Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. DOI 10.1287/mnsc.32.7.841. *Management Scienc*. 1986; 32(7): 841–855.

Информация об авторах:

Корнеенко Виктор Павлович — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН). Author ID (РИНЦ): 1043413;

Уколов Владимир Федорович — доктор экономических наук, профессор, Российский университет дружбы народов (РУДН), ул. Миклухо-Маклая, 6., Москва 117198, Россия. RINЦ AuthorID: 641366; Scopus Author ID: 57191343985;

Гомадо Этсе Дадсон — аспирант, РУДН.

Information about the authors:

Korneenko Viktor P. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Science (IPU RAS). Author ID (RSCI): 1043413; **Ukolov Vladimir F.** – Doctor of Economics, Professor, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russia. RSCI AuthorID: 641366; Scopus Author ID: 57191343985; **Gomado Etse Dadson** – postgraduate student, RUDN University.

Статья поступила в редакцию 03.09.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 30.11.2021.

The article was submitted 09/13/2021; approved after reviewing 11/30/2021; accepted for publication 11/30/2021