

УДК 519.8:658.5

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.1015>

EDN

[SLMQMY](#)

Подходы к разработке комбинированных DEA-методов для анализа сравнительной эффективности сложных систем

Е.В. Туева, Р.Ю. Шапорова*, Р.Ю. Шапоров

Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90,
Красноярск, 660049, Россия

*E-mail: r.shapорова@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу подходов к разработке комбинированных методов анализа среды функционирования (DEA) для оценки сравнительной эффективности сложных систем. В работе рассматриваются основные проблемы традиционных DEA-методов, такие как ограниченность относительной оценки, сложность агрегирования оценок, неуникальность весов и отсутствие Парето-оптимальности. Предлагаются различные подходы к преодолению этих ограничений, включая модификацию DEA с искусственными границами, использование вторичных целевых моделей, комбинирование с другими методами анализа, применение динамического DEA, модификацию для работы с отрицательными данными и использование нелинейных моделей. Статья также обсуждает преимущества комбинированных подходов и намечает перспективные направления дальнейших исследований в области DEA-методологии.

Ключевые слова: DEA-метод, анализ среды функционирования, сложная система, анализ сравнительной эффективности.

Approaches to developing combined DEA methods for analyzing comparative efficiency of complex systems

E.V. Tueva, R.Yu. Shapорова*, R.Yu. Shapороv

Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049,
Russia

*E-mail: r.shapорова@mail.ru

Abstract. This article analyzes approaches to developing combined Data Envelopment Analysis (DEA) methods for assessing the comparative efficiency of complex systems. The paper examines the main problems of traditional DEA methods, such as the limitations of relative evaluation, the complexity of aggregating assessments, non-uniqueness of weights, and the lack of Pareto optimality. Various approaches to overcoming these limitations are proposed, including DEA modification with artificial boundaries, the use of secondary goal models, combination with other analysis methods, application of dynamic DEA, modification for working with negative data, and the use of nonlinear models. The article also discusses the advantages of combined approaches and outlines promising directions for further research in DEA methodology.

Keywords: DEA method, data envelopment analysis, complex system, comparative effectiveness analysis.

1. Введение

В настоящее время использование DEA-метода (анализа среды функционирования) характеризуется широким спектром применений и постоянным совершенствованием методологии [1-4]. DEA активно применяется для оценки эффективности в различных отраслях, включая высшее образование, финансовый сектор [5], здравоохранение и производство [6-9].

В высшем образовании DEA используется для оценки эффективности университетов, факультетов и исследовательских подразделений, анализируя эффективность преподавания, научных исследований и трансфера технологий. В банковском секторе метод применяется для оценки эффективности банков и их филиалов, помогая оптимизировать операционную деятельность. В здравоохранении DEA используется для анализа эффективности больниц, врачей и медицинских учреждений [10].

Современное использование DEA характеризуется интеграцией с другими методами анализа. Разрабатываются гибридные модели, сочетающие DEA с алгоритмами машинного обучения для повышения точности прогнозирования эффективности. Применение нечетких DEA-моделей позволяет учитывать неопределенность входных и выходных данных.

DEA адаптируется для работы с большими объемами данных, что позволяет проводить более детальный анализ эффективности [11]. Метод также используется для оценки экологической и социальной эффективности организаций в контексте устойчивого развития [12, 13].

В методологическом плане разрабатываются динамические DEA-модели для анализа эффективности во времени, сетевые DEA-модели для оценки сложных систем с внутренними взаимосвязями, а также стохастические DEA-модели для учета случайных факторов в оценке эффективности [14-16].

Современное использование DEA-метода отличается его гибкостью и способностью адаптироваться к различным контекстам. Метод постоянно совершенствуется для решения сложных задач оценки эффективности в различных сферах деятельности, что делает его востребованным инструментом анализа в современных условиях.

Опыт применения традиционных DEA-методов позволяет сформулировать ряд проблем и ограничений, которые заставляют исследователей прибегать к модификации

методов или разработке комбинированных подходов. Статья [17] представляет собой комплексный обзор теории и применений метода оценки кросс-эффективности (CREE) в анализе среды функционирования - DEA. Авторы подчеркивают актуальность темы в контексте инженерного менеджмента, где часто возникают задачи оценки и ранжирования, такие как выбор проектов, оценка эффективности команд и выбор технологий. Традиционный метод DEA имеет недостатки, в частности, тенденцию преувеличивать влияние отдельных входов или выходов, что может приводить к нереалистичным результатам.

В качестве решения этой проблемы авторы рассматривают метод CREE, который обладает рядом преимуществ. CREE позволяет более полно ранжировать объекты оценки, используя обоснованные веса, сочетает механизмы самооценки и оценки со стороны, а также создает более справедливую атмосферу оценивания. Однако с расширением применения CREE выявились и некоторые проблемы, в частности, неуникальность весов из-за множественности оптимальных решений в DEA и неоптимальность по Парето при агрегировании оценок кросс-эффективности. В связи с этим авторы обсуждают основные направления исследований, направленных на совершенствование метода CREE. Среди них разработка вторичных целевых моделей для решения проблемы неуникальности весов, улучшение методов агрегирования оценок кросс-эффективности и расширение применений в различных областях инженерного менеджмента.

Статья также отмечает растущий интерес исследователей к CREE в последние годы, что подтверждается увеличением числа публикаций по этой теме. Большинство работ публикуется в журналах, специализирующихся на производственных операциях, исследовании операций и промышленной инженерии. В целом, статья предоставляет всесторонний обзор теоретических аспектов и практических применений CREE, а также намечает перспективные направления дальнейших исследований в этой области, что делает ее ценным ресурсом для специалистов и исследователей в сфере инженерного менеджмента и анализа эффективности. Таким образом, использование данного подхода позволяет избежать проблемы DEA-метода, связанной с неуникальностью весов, которая, как правило, приводит к нестабильным результатам.

В работе [18] отмечается ограниченность относительной оценки. Например, метод DEA-АСФ позволяет оценивать только относительную эффективность объектов

по сравнению друг с другом, что затрудняет получение абсолютных оценок эффективности. Здесь же внимание уделено сложности агрегирования оценок. Как показывает практика, часто возникают трудности при агрегировании оценок эффективности объектов в подсистемах на разных уровнях иерархии в единую интегральную оценку.

Авторы [19] описывают ситуации, когда результат DEA-анализа не является Парето-оптимальным, то есть, когда оценка эффективности, полученная методом арифметического усреднения, не является Парето-оптимальной. Это подчеркивает, что в DEA-методологии существует ряд сложностей, связанных с Парето-оптимальностью. Одна из основных проблем заключается в несоответствии между слабой DEA-эффективностью и слабой Парето-эффективностью. Хотя слабая DEA-эффективность является достаточным условием для слабой Парето-эффективности, она не является необходимым условием. Это означает, что DEA-неэффективная единица анализа (объект) может оказаться слабо Парето-эффективной. Кроме того, возникают трудности с граничными единицами, которые могут быть слабо Парето-эффективными, но не обязательно слабо DEA-эффективными.

В сетевых моделях DEA (NDEA) проблема усугубляется, так как некоторые распространенные методы не соответствуют понятию Парето-эффективности, что является фундаментальным свойством в DEA. Более того, в NDEA единица, признанная эффективной, может быть доминируема другой наблюдаемой единицей, что также нарушает принцип Парето-оптимальности. При оценке эффективности в сетевых структурах также необходимо учитывать не только входные и выходные параметры, но и промежуточные продукты между подразделениями, что усложняет анализ Парето-оптимальности. Эти трудности указывают на необходимость разработки более совершенных подходов к оценке эффективности в DEA, особенно для сложных сетевых структур, чтобы обеспечить соответствие принципам Парето-оптимальности и повысить точность оценки эффективности.

Данный анализ позволяет сформулировать следующие проблемы традиционных DEA-методов:

1. Ограниченность относительной оценки. Метод DEA-АСФ позволяет оценивать только относительную эффективность объектов по сравнению друг с другом, что затрудняет получение абсолютных оценок эффективности.

2. Сложность агрегирования оценок. Возникают трудности при агрегировании оценок эффективности объектов в подсистемах на разных уровнях иерархии в единую интегральную оценку.

3. Неуникальность весов. При использовании DEA возникает проблема неуникальности весов, что может приводить к нестабильным результатам.

4. Отсутствие Парето-оптимальности. Эффективность, полученная методом арифметического усреднения, не является Парето-оптимальной.

2. Материалы и методы

Данное исследование базируется на комплексном анализе литературы по проблемам и подходам к разработке комбинированных методов анализа среды функционирования – DEA-методов. Исследование включало сбор данных, в ходе которого была осуществлена систематическая выборка научных статей, монографий, посвященных DEA и его модификациям. Включались работы, содержащие описание проблем традиционных DEA-методов, предложения по модификации DEA, комбинированные подходы на основе DEA и перспективные направления исследований в области DEA. Использовался метод контент-анализа, в результате чего ключевые проблемы и подходы были систематизированы и сгруппированы. Это позволяет сформулировать основные проблемы традиционных DEA-методов, подходы к разработке комбинированных методов и перспективные направления исследований. Данная методология позволила провести анализ современного состояния и тенденций развития комбинированных DEA-методов для оценки сравнительной эффективности сложных систем.

3. Результаты и обсуждение

Анализ современных исследований в области DEA выявил несколько ключевых подходов к разработке комбинированных методов, направленных на преодоление ограничений классического DEA и повышение его эффективности в оценке сложных систем [20-22].

Модификация DEA с искусственными границами представляет собой перспективное направление развития метода. Введение искусственных эталонных границ эффективности, формируемых экспертами на основе внешней информации, позволяет учитывать дополнительные факторы, не отраженные в исходных данных. Этот

подход особенно ценен в ситуациях, когда имеющиеся данные не в полной мере отражают реальную эффективность оцениваемых объектов.

Использование вторичных целевых моделей для выбора весов в DEA является эффективным решением проблемы неуникальности весов. Разработка расширенных вторичных целевых моделей позволяет получить более стабильные и обоснованные результаты оценки эффективности. Этот подход особенно важен в контексте кросс-эффективности, где проблема неуникальности весов может существенно влиять на итоговые оценки.

Комбинирование DEA с другими методами анализа открывает новые возможности для комплексной оценки эффективности. Интеграция DEA с методами многокритериальной поддержки принятия решений позволяет учитывать противоречивые критерии и получать более сбалансированные оценки. Сочетание DEA с методами регрессионного анализа и анализа стохастической границы производственной функции расширяет аналитические возможности метода, позволяя учитывать стохастическую природу данных и выявлять факторы, влияющие на эффективность.

Динамический анализ с использованием DEA представляет собой важное направление развития метода, позволяющее оценивать эффективность объектов во времени. Этот подход особенно ценен для анализа долгосрочных тенденций и оценки устойчивости эффективности объектов.

Модификация DEA для работы с отрицательными данными расширяет область применения метода. Разработка подходов на основе функции направленного расстояния позволяет анализировать ситуации, где присутствуют отрицательные значения входов или выходов, что часто встречается в реальных экономических и управленческих задачах.

Использование нелинейных моделей в DEA открывает новые возможности для анализа сложных систем с нелинейными зависимостями между входами и выходами. Разработка структуры для нелинейных моделей DEA на основе подхода наименьшего расстояния позволяет более точно описывать реальные производственные процессы.

Комбинирование DEA с методами, основанными на энтропии Шеннона, представляет собой инновационный подход к повышению дискриминационной

способности DEA. Этот метод позволяет учитывать важность различных комбинаций переменных и получать более полную картину эффективности оцениваемых объектов.

Представленные результаты и их обсуждение позволяет сформировать основные подходы к разработке комбинированных методов [23-25], которые целесообразно сгруппировать следующим образом.

1. Модификация DEA с искусственными границами. Предлагается модифицировать метод DEA-АСФ путем введения искусственных эталонных границ эффективности, формируемых экспертами на основе внешней информации.

2. Использование вторичных целевых моделей. Разработка расширенных вторичных целевых моделей для выбора весов в DEA позволяет решить проблему неуникальности весов.

3. Комбинирование с другими методами:

- Интеграция DEA с методами многокритериальной поддержки принятия решений для объединения противоречивых критериев.
- Сочетание DEA с методами регрессионного анализа и анализа стохастической границы производственной функции.

4. Динамический анализ. Применение динамического DEA для оценки эффективности объектов во времени.

5. Модификация для работы с отрицательными данными. Разработка подходов на основе функции направленного расстояния для работы с отрицательными данными в DEA.

6. Использование нелинейных моделей. Разработка структуры для нелинейных моделей DEA на основе подхода наименьшего расстояния.

На основе анализа в таблице 1 представлены основные проблемы традиционных DEA-методов и подходы к их решению. Таблица 2 представляет преимущества комбинированных подходов в DEA-методологии.

Таблица 1. Подходы к решению основных проблем традиционных DEA-методов.

Проблема	Подход к решению
Ограниченность относительной оценки	Модификация DEA с искусственными границами
Сложность агрегирования оценок	Использование вторичных целевых моделей
Неуникальность весов	Разработка расширенных вторичных целевых моделей
Отсутствие Парето-оптимальности	Комбинирование DEA с методами многокритериальной поддержки принятия решений

Таблица 2. Достигнутые преимущества комбинированных подходов.

Комбинированный подход	Преимущество
DEA + Искусственные границы	Учет дополнительных факторов, не отраженных в исходных данных
DEA + Вторичные целевые модели	Получение более стабильных и обоснованных результатов оценки
DEA + Многокритериальные методы	Учет противоречивых критериев и получение сбалансированных оценок
Динамический DEA-метод	Оценка эффективности объектов во времени
DEA для отрицательных данных	Анализ ситуаций с отрицательными значениями входов/выходов
Нелинейные модели DEA	Анализ систем с нелинейными зависимостями между входами и выходами

В целом, разработка комбинированных DEA-методов направлена на преодоление ограничений классического подхода и расширение возможностей анализа сравнительной эффективности сложных систем. Интеграция различных подходов позволяет создавать более гибкие и точные инструменты оценки эффективности, учитывающие специфику конкретных прикладных областей и особенности анализируемых данных.

4. Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены основные проблемы традиционных DEA-методов и рассмотрены подходы к разработке комбинированных

методов для анализа сравнительной эффективности сложных систем. Ключевыми проблемами являются ограниченность относительной оценки, сложность агрегирования оценок, неуникальность весов и отсутствие Парето-оптимальности.

Для преодоления этих ограничений предложены различные подходы, включая модификацию DEA с искусственными границами, использование вторичных целевых моделей, комбинирование с другими методами анализа, применение динамического DEA, модификацию для работы с отрицательными данными и использование нелинейных моделей.

Перспективные направления дальнейших исследований включают разработку методов формирования искусственных эталонных границ эффективности с учетом специфики конкретных предметных областей, исследование возможностей интеграции DEA с методами машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точности оценок, развитие подходов к анализу эффективности сложных иерархических систем с учетом взаимосвязей между уровнями иерархии, совершенствование методов агрегирования оценок эффективности для получения интегральных показателей сложных систем, а также разработку комбинированных методов, позволяющих одновременно оценивать эффективность и выявлять факторы неэффективности объектов.

Дальнейшее развитие комбинированных DEA-методов позволит создать более гибкие и точные инструменты оценки эффективности, учитывающие специфику различных прикладных областей и особенности анализируемых данных.

Список литературы

1. Kovalev, I. The efficiency analysis of the automated plants / I. Kovalev, P. Zelenkov, S. Ognerubov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 70. – 2015. – P. 012007. – DOI: 10.1088/1757-899X/70/1/012007. – EDN: UEMYPJ.
2. Ковалев, И. В. Анализ эффективности организационно-технологических комплексов предприятий / И. В. Ковалев, А. А. Новожилов, Т. А. Рукавицына // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 4(42). – С. 36-39. – EDN: NBIRKP.
3. Kovalev, I. Cost-effectiveness analysis of the implementation of transport and technological cycles in the swarm use of agricultural UAVs / I. Kovalev, D. Kovalev, K. Astanakulov [et

- al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – V. 471. – P. 04017. – DOI: 10.1051/e3sconf/202447104017. – EDN: LGAJJO.
4. Akramova, O. K. Improvement of assessment system of investment attractiveness of regions / O. K. Akramova // Informatics. Economics. Management. – 2024. – № 3(2). – С. 0115-0125. – DOI:10.47813/2782-5280-2024-3-2-0115-0125.
 5. Карцан, И. Н. Использование искусственного интеллекта в бизнес-аналитике / И. Н. Карцан, С. А. Нуриев // Современные инновации, системы и технологии. – 2024. - № 4(3). – С. 0146-0156. –DOI: 10.47813/2782-2818-2024-4-3-0146-0156.
 6. Ковалев, И. В. Принятие управленческих решений на основе анализа эффективности организационно-технологических комплексов предприятий / И. В. Ковалев, А. А. Новожилов, Т. А. Рукавицына // Экономика и менеджмент систем управления. – 2011. – № 1(1). – С. 36-42. – EDN: OEZOXJ.
 7. Туев, Е. В. Реализация мониторинга эффективности предприятий с помощью специальной подсистемы АСУП / Е. В. Туев, М. Козлова, О. Ольшевская // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – № 1(2). – С. 34–45. – DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-2-34-45.
 8. Масаев, С. Н. Методика комплексной оценки управленческих решений в производственных системах с применением корреляционной адаптометрии: диссертация ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Масаев Сергей Николаевич. – Красноярск, 2011. – 214 с. – EDN QFEOEV.
 9. Ковалев, Д.И. Обзор подходов и методов к оценке сравнительной эффективности технологических процессов и производств / Д. И. Ковалев, М. Козлова, О. Ольшевская, Т. Мансурова // Современные инновации, системы и технологии. – 2021. – № 1(3). – С. 1-21. – DOI: 10.47813/2782-2818-2021-1-3-1-21.
 10. Покушко, М. В. Использование метода анализа охвата данных для оценки эффективности предприятий / М.В. Покушко, А.А. Ступина, Е.С. Дресвянский [и др.] // Информатика. Экономика. Управление. – 2022. - № 1(1). – С. 0101–0109. – DOI: 10.47813/2782-5280-2022-1-1-0101-0109.
 11. Моторыгин, П. Ю. Применение больших данных для прогнозирования финансовых рынков / П. Ю. Моторыгин, А. Д. Ветрова // Информатика. Экономика. Управление. – 2024. – № 3(4). – С. 0322-0329. – DOI: 10.47813/2782-5280-2024-3-4-0322-0329.

12. Zenyutkin, N. V. DEA method application to evaluating the efficiency of heat and wind generating complexes / N. V. Zenyutkin, I. V. Kovalev, M. V. Karaseva [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – V. 734. – 2020. – P. 12213. – DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012213. – EDN: YRSOGB.
13. Kovalev, I.V. Analysis of the comparative efficiency of wind turbines based on the basic and modified DEA model / I. V. Kovalev, A. A. Voroshilova, D. I. Kovalev [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2022. – V. 2. – P. 060052. – DOI: 10.1063/5.0092423. – EDN: UILKAT.
14. Гончарова, И. С. Повышение эффективности метода DEA за счет предварительного анализа параметров предприятия / И. С. Гончарова, И. В. Ковалев // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 1. – № 7. – С. 313-314. – EDN: TAOYIJ.
15. Kovalev, I.V. Combined efficiency margin in the implementation of the DEA method / I. V. Kovalev, A. S. Kuznetsov, N. V. Zenutkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 734. – P. 12036. – DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012036. – EDN: AQYUVC.
16. Kovalev, I. Extension of a model in the DEA methodology / I. Kovalev, M. Karaseva, T. Rukavitsyna // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2010. – No. S. – P. 58-60. – EDN: MVMLBH.
17. Wu, J. Methods and applications of DEA cross-efficiency: Review and future perspectives / J. Wu, J. Sun, L. Liang // Frontiers of Engineering Management. – 2021. – V. 8. – I. 2. – P. 199-211. – DOI: 10.1007/s42524-020-0133-1.
18. Моргунова, О. Н. Экспертные методы формирования искусственных границ эффективности / О. Н. Моргунова // Научное обозрение. – 2006. – № 5. – С. 37-41.
19. Wu, J. DEA cross-efficiency evaluation based on Pareto improvement / J. Wu, J. Chu, J. Sun, Q. Zhu // European Journal of Operational Research. – 2016. – V. 248(2). – P. 571-579.
20. Kuosmanen, T. Theory of integer-valued data envelopment analysis / T. Kuosmanen, R. Kazemi Matin // European Journal of Operational Research. – 2009. – V. 192. – № 3. – P. 658-667.
21. Tone, K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis / K. Tone // European Journal of Operational Research. – 2001. – V. 130. – № 3. – P. 498-509.

22. Moazenzadeh, Z. A slacks-based nonlinear DEA model with integer data: an application to departments of the Islamic Azad University, Karaj Branch in Iran / Z. Moazenzadeh, S. Saati, R.F. Saen [et al.] // Operations Research and Decisions. – 2022. – V. 32. – № 3. – P. 80-91.
23. Ковалев, Д. И. Анализ организационно-технологических комплексов предприятий на основе аналитического метода оценки эффективности сложных систем / Д.И. Ковалев, Е.В. Туева, А.В. Клименко // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8-2. – С. 159-162.
24. Gareev, T. R. Evaluating the efficiency of the research sector in Russian regions: a dynamic data envelopment analysis / T. R. Gareev, I. Yu. Peker, T. Yu. Kuznetsova, N.A. Eliseeva. // Baltic Region. – 2023. – № 15(2). – P. 82-102. – DOI:10.5922/2079-8555-2023-2-5.
25. Pokushko, M. Algorithm for Application of a Basic Model for the Data Envelopment Analysis Method in Technical Systems / M. Pokushko, A. Stupina, I. Medina-Bulo [et al.] // Algorithms. – 2023. – V. 16(10). – P. 460. – DOI: 10.3390/a16100460.