

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ СЕТЕВОГО АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ (NETWORK DATA ENVELOPMENT ANALYSIS)*

Светлана Валерьевна РАТНЕР^{а,*},

Артем Михайлович ШАПОШНИКОВ^б

^а доктор экономических наук, главный научный сотрудник
лаборатории экономической динамики и управления инновациями,
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН);
профессор кафедры экономико-математического моделирования,
Российский университет дружбы народов (РУДН),
Москва, Российская Федерация
lanaratner@ipu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>
SPIN-код: 7840-4282

^б кандидат экономических наук, старший преподаватель
кафедры международной коммерции Высшей школы корпоративного управления,
Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации (РАНХиГС);
научный сотрудник кафедры экономико-математического моделирования,
Российский университет дружбы народов (РУДН),
Москва, Российская Федерация
horen25@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3720-2725>
SPIN-код: 7451-6291

* Ответственный автор

История статьи:

Reg. № 105/2023
Получена 30.03.2023
Получена в
доработанном виде
10.04.2023
Одобрена 18.04.2023
Доступна онлайн
30.05.2023

УДК 338.2

JEL: C61, C67, O4

Специальность 5.2.3

Аннотация

Предмет. Современная методология оценки сравнительной эффективности деятельности однородных экономических агентов – анализ среды функционирования (Data Envelopment Analysis, DEA) – за последние годы получила существенное развитие за счет разработки новых моделей, позволяющих учитывать структуру экономических агентов и/или их производственных систем. Включение в модель априорной информации о структуре производственных и управленческих процессов экономического агента существенно повышает информативность результатов моделирования с помощью анализа среды функционирования и позволяет существенно расширить спектр практических приложений данной методологии.

Цели. Систематизация и классификация современных практических приложений сетевого анализа среды функционирования, идентификация типов дополнительной информации, которая может быть извлечена из решения задач сетевого анализа среды функционирования для стратегического менеджмента компаний (организаций).

Методология. Систематический литературный обзор.

Результаты. Наиболее активно многоэтапные модели DEA в настоящее время используются для моделирования и оценки эффективности деятельности банков, цепей поставок, состоящих из связки «поставщик –

* Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда, проект № 22-78-10089.
URL: <https://rscf.ru/project/22-78-10089/>

Ключевые слова:

сетевой анализ среды функционирования, поэтапное моделирование, частичная эффективность, системная эффективность, сетевая структура

производитель – дистрибьютор», инновационных, высокотехнологичных компаний (или территорий), а также компаний, чья деятельность регламентируется жесткими экологическими нормами. Меньше всего многоэтапные модели DEA пока что применяются для моделирования потребительского поведения как последовательного процесса, состоящего из множества этапов, что объясняется неразвитостью подходов к измерению факторов потребительского поведения.

Выводы. В качестве основного различия между типами многоэтапных сетевых моделей можно выделить отсутствие или наличие общих входов для нескольких этапов, которые разделяются в определенной пропорции между этапами (подсистемами). Данный фактор существенно влияет на вид оптимизационной модели и на подходы к ее решению. Наличие общих входов порождает необходимость решения дополнительной оптимизационной задачи по распределению ресурсов между подсистемами.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2023

Для цитирования: Ратнер С.В., Шапошников А.М. Практические приложения сетевого анализа среды функционирования (Network Data Envelopment Analysis) // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2023. – Т. 22, № 5. – С. 800 – 828.
<https://doi.org/10.24891/ea.22.5.800>

Анализ среды функционирования (Data Envelopment Analysis, DEA) в настоящее время является одной из наиболее быстро развивающихся областей исследования операций с большим количеством приложений в области экономики и менеджмента [1, 2]. Анализ среды функционирования позволяет проводить сравнительную оценку эффективности деятельности однородных экономических агентов лишь на основе знаний об объемах потребляемых ими ресурсов (входов) и объемах производимой полезной продукции (выходы), при этом какой-либо дополнительной информации о виде производственной функции экономического агента не требуется [3, 4]. Эффективность экономического агента определяется как отношение взвешенной линейной комбинации выходов к взвешенной линейной комбинации входов, то есть является обобщением традиционного понимания эффективности. Решение задачи DEA (которое состоит в решении задачи оптимизации по весам) позволяет лицу, принимающему решения (ЛПР), не только выделить наиболее и наименее эффективные производственные объекты, но и рассчитать целевые параметры входов или выходов, при которых неэффективные объекты могут достичь эффективности, определить бенчмарки из числа других производственных объектов в выборке и выработать на основе этой информации оптимальную стратегию по повышению эффективности деятельности производственного объекта [5, 6]. Тем не менее информативность традиционных моделей DEA довольно ограничена, в частности, она не позволяет находить источник неэффективности производственного объекта.

В отличие от традиционных моделей DEA, которые рассматривают производственные объекты (DMU) как системы «черный ящик», в которых

известны только входы и выходы, сетевые модели DEA являются важным развитием методологии сравнительной оценки эффективности деятельности экономических агентов [7–9]. Если исследователю априори известны любые дополнительные сведения о структуре производственного объекта (DMU) или процессе его функционирования, то логичным развитием традиционной модели будет разбиение DMU на две или более подсистемы (или этапа), которые связаны между собой так называемыми промежуточными выходами, то есть такими выходами одной подсистемы, которые одновременно являются входами другой подсистемы. При введении такой усложненной структуры ПО в модель значительно возрастает информативность результатов решения задачи, появляется возможность более точного определения источника неэффективности и, следовательно, возникают дополнительные возможности для оптимизации стратегии функционирования моделируемых экономических агентов [10].

Поэтому в научной литературе в последние годы наблюдается бум интереса к моделированию деятельности экономических агентов различных отраслей и секторов экономики с помощью сетевых моделей DEA. Например, динамика количества статей в базе научных публикаций Science Direct (*рис. 1*) показывает, что с 2009 г. наблюдается значительный рост количества публикаций, посвященных тематике сетевого анализа среды функционирования, а примерно с 2016 г. – практически экспоненциальный рост их количества.

При таком росте количества публикаций по тематике сетевого DEA наблюдается значительное отставание числа обзорных статей от числа оригинальных. Например, по данным уже упомянутой базы научной литературы Science Direct, количество обзорных статей за период с 1998 по 2022 г. составило лишь 1,5% от общего числа публикаций по данной тематике. Причем большинство обзорных статей посвящены либо систематизации подходов к решению задач сетевого DEA [11], либо затрагивают какую-то отдельную сферу практических приложений [12–14].

Целью настоящей работы является проведение литературного обзора, систематизация и классификация современных практических приложений сетевого анализа среды функционирования, идентификация типов дополнительной информации, которая может быть извлечена из решения задач сетевого анализа среды функционирования для стратегического менеджмента компаний (организаций). Информационной базой исследования послужили научные журналы, входящие в Science Direct. Выбор данной базы научных публикаций в качестве основной объясняется тем, что в настоящее время доступ к аналитическим инструментам базы SCOPUS для российских пользователей ограничен, а доступ к базе Web of Science закрыт полностью. Однако, несмотря на данные ограничения, проведенный нами дополнительный пилотный поиск публикаций по Google Academy за последние два года показал, что те источники, которые не попадают в Science Direct, размещаются преимущественно в журналах университетов Ирана, Индонезии, Тайваня, Польши, Болгарии, которые имеют низкий рейтинг и часто

вообще недоступны на английском языке (доступны только названия и аннотации). Поэтому данное ограничение существенно не повлияло на широту охвата работ и глубину проведенного контент-анализа.

Систематический литературный обзор, как правило, состоит из трех основных этапов: поиска и скрининга литературных источников; описательного анализа выборки публикаций и отбора литературных источников по заранее определенным критериям и проведение их контент-анализа [15, 16].

При проведении поиска важна формулировка поискового запроса, которая позволяет обеспечить наиболее широкий охват публикаций. В нашем исследовании был проведен пилотный поиск, в результате которого было установлено, что сетевые модели DEA в литературе часто называются двухэтапными, трехэтапными и многоэтапными. Кроме того, помимо развернутого названия метода Data Envelopment Analysis, в литературе часто используется распространенная аббревиатура DEA. Поэтому использовалась следующая формулировка поискового запроса: «network DEA» OR «network Data Envelopment Analysis» OR «multistage DEA» OR «multistage Data Envelopment analysis» OR «two stage DEA» OR «two stage Data Envelopment analysis» OR «three stage DEA» OR «three stage Data Envelopment analysis». Поиск проводился по мета-данным статьи (название, аннотация, ключевые слова). Глубина поиска задавалась в двух вариантах: максимальная (с 1998 по 2022 г.) для выбранной базы публикаций; за последние 5 лет.

В процессе скрининга выбранных литературных источников проверяется соответствие заданным временным границам поиска, тематике, а также устраняется дублирование публикаций, которое часто возникает из-за различий в написании библиографических ссылок. Описательный анализ выборки публикаций предполагает исследования динамики количества публикаций, распределение публикаций по отраслям знаний, географии, авторам, цитируемости и т. д. Это позволяет выделить основные тенденции развития выбранного научного направления, определить работы и ученых, оказавших наибольшее влияние на это развитие, идентифицировать наиболее актуальные проблемы. В результате данного этапа круг работ, отобранных для последующего качественного контент-анализа, как правило, несколько сужается.

При проведении контент-анализа основное внимание уделяется научным результатам, полученным авторами. Причем научные результаты тоже могут рассматриваться с разных точек зрения: развития самой методологии, практических приложений метода, новых теоретических знаний, которые вытекают из результатов авторов для конкретной области науки. В нашем исследовании контент-анализ публикаций проводился с точки зрения развития практических приложений метода, поэтому нас интересовало, как и какие именно экономические объекты моделируются посредством сетевой модели DEA, какие этапы (подпроцессы)

выделяются, какими наборами входов и выходов описываются экономические агенты и их подсистемы.

Распределение публикаций по тематике сетевого анализа среды функционирования по областям знания за весь период и за последние пять лет представлено на *рис. 2, 3*.

Сравнивая диаграммы, нетрудно заметить, что в целом распределение публикаций по областям знаний остается стабильным, однако в последние пять лет по сравнению с предыдущими периодами заметен небольшой спад доли публикаций по принятию решений и небольшой рост доли публикаций о науках об окружающей среде и компьютерных науках, что может свидетельствовать о росте публикаций практического плана. Распределение публикаций по ключевым словам, выполненное с помощью программного комплекса VOSviewer (*рис. 4*), показывает, что наряду с базовой терминологией наиболее часто в статьях употребляются такие ключевые слова, как «цепочка поставок» (supply chain), «банки» (banks), «эффективность инноваций» (innovation efficiency), «экологическая эффективность» (environmental efficiency), «устойчивость» (sustainability), «аэропорты» (airports), «возобновляемая энергетика» (renewable energy) и «распределение электроэнергии» (electricity distribution). По данному распределению можно судить о наиболее часто встречающихся приложениях сетевого анализа среды функционирования.

Для проведения контент-анализа из 326 статей, найденных в результате формирования поисковых запросов в Science Direct с ограничением по периоду охвата, равному последним пяти годам, в итоге было отобрано 53 статьи. Остальные статьи либо сами по себе носят обзорный характер, либо упоминают многоэтапные или сетевые модели DEA как один из популярных типов моделей DEA в литературном обзоре или дискуссии [17–20], либо под многоэтапными моделями понимают не особую структуру производственных объектов, а несколько этапов исследования. В таких исследованиях на определенном этапе используется DEA, а на других этапах исследования используются другие методы экономико-математического моделирования, такие как регрессионный анализ, факторный анализ, бутстрэппинг и др. В статье [21] в контексте описания двухэтапных моделей функционирования банков даже предлагается новая терминология для разграничения этих подходов. Авторы предлагают называть модели, в которых производственный объект имеет сложную структуру, состоящую из двух подсистем, внутренними двухэтапными моделями, а модели, в которых DEA используется в качестве одного из этапов исследования – внешними двухэтапными моделями. Однако, судя по тому, что предложенная терминология больше нигде не используется, ее жизнеспособность не доказана. Также достаточно большая доля работ посвящена развитию теории и методологии сетевого DEA (например, более информативным методам расчета эффективности каждой отдельной подсистемы производственного объекта и его эффективности в целом, анализу формы границы эффективности и т. д.).

Одним из наиболее распространенных приложений сетевого DEA является моделирование деятельности банков и других финансовых учреждений [22–27]. При этом выделяется этап (или подсистема) привлечения капитала и этап инвестиционного размещения капитала (рис. 5). Как входы первого этапа (X) могут рассматриваться основные средства и заработная плата сотрудников, как промежуточный выход первого этапа (Z) рассматриваются депозиты клиентов. В качестве системных выходов (Y) могут рассматриваться проценты, получаемые от кредитов, а также в качестве так называемых нежелательных выходов могут рассматриваться необслуживаемые кредиты. В работе [26] дополнительно выделяется этап получения прибыли (трехэтапная модель), а также учитывается то, что неиспользованные активы могут переноситься на следующие периоды функционирования банка.

В источниках [28–32] моделируется работа сети поставок. Например, в работе [29] изучается задача оптимизации работы цепи «онлайн магазин – доставка». Входами на обоих этапах (компания по доставке, компания-продавец) являются заработная плата и затраты на социальное обеспечение сотрудников, а также затраты на обеспечение функционирования предприятия. Выходами каждого этапа являются прибыль соответствующей компании. Промежуточным выходом является общий операционный доход от доставки.

В работах [33–38] строятся многоэтапные модели для инновационного процесса, который в общем случае разделяется на стадию исследований и разработок (ИиР) и на стадию коммерциализации. Например, в работе [36] инновационный процесс на высокотехнологичных предприятиях моделируется с помощью двухэтапной модели (рис. 6). Входами первого этапа (ИиР) являются затраты на исследовательское оборудование, а также количество исследователей. Причем второй вход делится между первым и вторым этапом в определенной экзогенно заданной пропорции. Выходами первого этапа и одновременно входами второго являются патентные заявки и действующие патенты. Кроме того, входами второго этапа (коммерциализации) являются затраты на техническую модернизацию, затраты на приобретение национальных и иностранных технологий, затраты на адаптацию технологий и затраты на разработку новых продуктов. Выходами второго этапа являются выручка от продажи новых продуктов и количество технических контрактов, заключенных на внутреннем рынке.

В близкой по содержанию работе [37] в качестве ПО рассматриваются регионы. Входами этапа ИиР являются количество занятых в ИиР и внутренние затраты на ИиР. Выходы первого этапа и одновременно входы второго – заявки на патенты и разработанные новые продукты. Общие входы, которые делятся между первым и вторым этапом – это общая база патентов и основные средства. Кроме того, входами второго этапа являются затраты на разработку новых продуктов, затраты на модернизацию и количество занятых. Выходом второго этапа является общая выручка от продажи новых продуктов.

Статьи [39–43] посвящены моделированию производственных процессов с позиций эко-эффективности, поэтому в них вся производственная деятельность экономических агентов естественным образом разделяется на производственную подсистему и подсистему, ответственную за экологичность (очистку выбросов, создание эко-инноваций и т.д.). Например, авторы работы [39] моделируют деятельность промышленного предприятия двумя этапами – производство и очистка сточных вод и выбрасываемых в атмосферу газов. Входами первого этапа являются труд, капитал и энергия, а выходами – добавочная стоимость, выбросы CO_2 , твердые отходы, образование загрязненных сточных вод, образование $\text{NH}_3\text{-H}$, образование SO_2 и образование мелкодисперсных частиц. Объемы загрязняющих веществ в сточных водах и атмосферных газах являются входом второго этапа. Дополнительными входами второго этапа являются оборудование для очистки сточных вод и газов и затраты на очистку сточных вод и газов. В работе [41] рассматриваются страны в аспекте генерации и реализации эко-инноваций. Используется двухэтапная модель DEA, на первом этапе оценивается эко-эффективность экономики, а на втором – эффективность реализации эко-инноваций. Входами первого этапа являются труд, земля и энергия, промежуточными выходами – ВВП и выбросы парниковых газов. Заметим, что один промежуточный выход является желательным, а второй – нежелательным. Выходами второго этапа являются количество занятых в ИиР, экспорт высокотехнологичной продукции, количество сертификатов ISO 14001 на системы экологического менеджмента и количество электроэнергии, произведенной из возобновляемых источников.

В статьях [44–47] в качестве производственных объектов рассматривают организации сектора высшего образования, деятельность которых делится на два этапа: образовательный и научно-исследовательский. В простейшем случае [44] первая подсистема описывается такими входами, как финансирование, количество аспирантов и численность персонала. Выход (промежуточный) – количество публикаций. Единственным входом второго этапа является сумма грантов. В более сложном случае [46] образовательная деятельность делится на два подпроцесса: процесс бакалавриата и магистратуры. Сам уровень выпускника представлен двумя блоками, первый из которых отвечает за образование, а второй – за научные исследования (рис. 7). Единственный вклад – это финансирование. Промежуточными результатами являются количество студентов и аспирантов z_1 , количество профессоров z_2 , количество технического и административного персонала z_3 , площадь университетских зданий, используемых для занятий и исследований z_4 . Все эти результаты распределяются между блоками бакалавриата и магистратуры. Единственным промежуточным результатом, который не является общим для этих блоков, является количество учащихся на заданном уровне z_5 . Между вторым и третьим этапами имеются также промежуточные результаты – количество защищенных магистерских и докторских диссертаций. Результатом первого подпроцесса является выходной индекс, новая переменная, введенная в этом исследовании, которая является произведением

количества студентов и качества образования. Результатом второго подпроцесса является количество патентов и количество публикаций в Scopus.

Коэффициент α , отражающий долю входа, полученного первым подпроцессом второго этапа, ограничен рамками от 60 до 90%. Его точное значение определяется решением дополнительной задачи оптимизации.

В работе [47] подразделение университета (бизнес-школа) моделируется как многоуровневая иерархическая структура. Подразделение состоит из трех основных функций: учебной, исследовательской и предпринимательской. Преподавание далее делится на бакалавриат и аспирантуру.

Статьи [48, 49] моделируют эффективность больниц. Так, в работе [49] авторы рассматривают общую структуру с пятью основными службами: стационарная служба, служба операционной, служба амбулаторных операций, служба приема к врачу и служба неотложной помощи. Соответствующими входными данными являются скорректированные затраты на оплату труда, эксплуатационные расходы, затраты на клинические материалы и затраты на аутсорсинг. Выходами системы являются количество пациентов, покидающих стационар, количество запланированных операций в операционной, количество срочных операций в операционной, количество операций, не связанных с анестезией или респираторной поддержкой, в амбулаторной службе – количество консультаций, проведенных врачом в службе врачебных приемов, и количество неотложной медицинской помощи, оказанной службой скорой медицинской помощи. Промежуточные выходы представляют собой связи между подразделениями и соответствуют потокам пациентов между отдельными службами с точки зрения их соответствующих показателей. Интересной особенностью этой работы является то, что значения упомянутых промежуточных выходов недоступны. Авторы используют метод бутстрепинга для генерации данных.

Авторы работы [50] рассматривают случай производства электроэнергии (первый этап) и передачи электроэнергии (второй этап) в Китае. Входными данными первого этапа являются установленная мощность электростанций, сырой уголь и инвестиции в производство, тогда как желаемым выходом является объем вырабатываемой электроэнергии. Входными данными второго этапа являются произведенная электроэнергия (промежуточный выпуск) и инвестиции в сеть (дополнительный экзогенный ввод), желательный выпуск определяется как проданная электроэнергия, а нежелательный выпуск включает потери электроэнергии. Аналогичный подход используется в работе [51] для моделирования электроэнергетической системы Ирана в виде трехступенчатой структуры энергосистемы со стадиями генерации, передачи и распределения.

Остальные работы моделируют деятельность компаний различных отраслей экономики: авиаперевозчиков [52], компаний обрабатывающей промышленности [53–55], национальных логистических компаний [56], сети магазинов модной одежды [57],

транспортной системы [58], страховых компаний [59] и даже правительств разных стран в борьбе с пандемией COVID-19 [60].

В традиционных методах DEA производственные объекты рассматриваются как система «черный ящик», то есть их внутренняя структура часто игнорируется. В многоэтапных сетевых моделях DEA производственные объекты моделируются как системы, состоящие из нескольких последовательных производственных объектов, где выходы первого производственного объекта являются входами второго производственного объекта и т.д. В наиболее общем случае структура производственного объекта может состоять из сколь угодно большого количества подсистем, однако на деле практически не встречаются случаи, когда производственный объект состоит более чем из трех подсистем.

Многоэтапная модель DEA позволяет лучше выявлять источники неэффективности производственного объекта. По сути, разбиение производственного объекта на несколько подсистем позволяет интегрировать экспертные знания о предполагаемой структуре и последовательности производственных процессов в постановку задачи DEA. Этим объясняется растущий интерес к многоэтапным сетевым моделям DEA в научной литературе и постоянно расширяющийся спектр практических приложений таких моделей DEA.

Наиболее активно многоэтапные модели DEA в настоящее время используются для моделирования и оценки эффективности деятельности банков, цепей поставок, состоящих из связки «поставщик – производитель – дистрибьютор», инновационных и высокотехнологичных компаний (или территорий), а также компаний, чья деятельность регламентируется жесткими экологическими нормами. Меньше всего многоэтапные модели DEA пока что применяются для моделирования потребительского поведения как последовательного процесса, состоящего из множества этапов, что объясняется неразвитостью подходов к измерению факторов потребительского поведения.

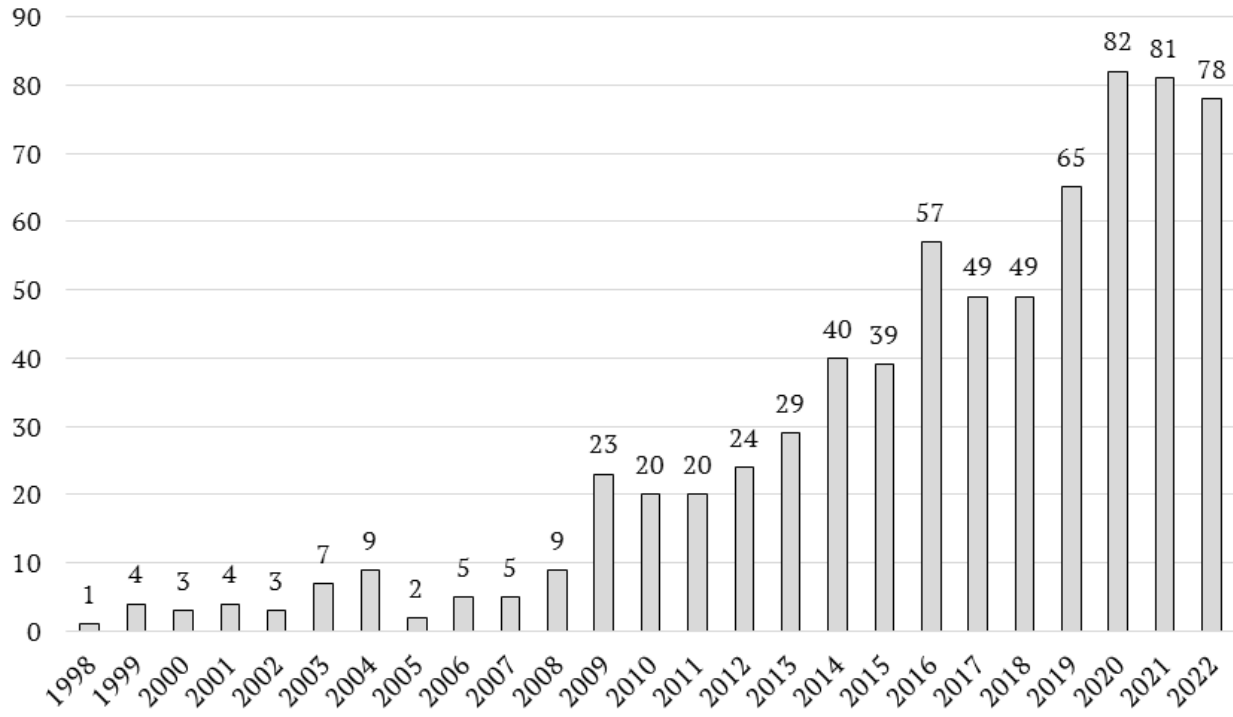
В качестве основного различия между типами многоэтапных сетевых моделей можно выделить отсутствие или наличие общих входов для нескольких этапов, которые разделяются в определенной пропорции между этапами (подсистемами). Данный фактор существенно влияет на вид оптимизационной модели и на подходы к ее решению. Наличие общих входов порождает необходимость решения дополнительной оптимизационной задачи по распределению ресурсов между подсистемами.

Рисунок 1

Динамика количества публикаций по сетевому DEA в базе научных публикаций Science Direct в 1998–2022 гг. (поиск по мета-данным)

Figure 1

Number of publications on DEA in the Science Direct scientific publications database for 1998–2022 (search by metadata)



Источник: авторская разработка

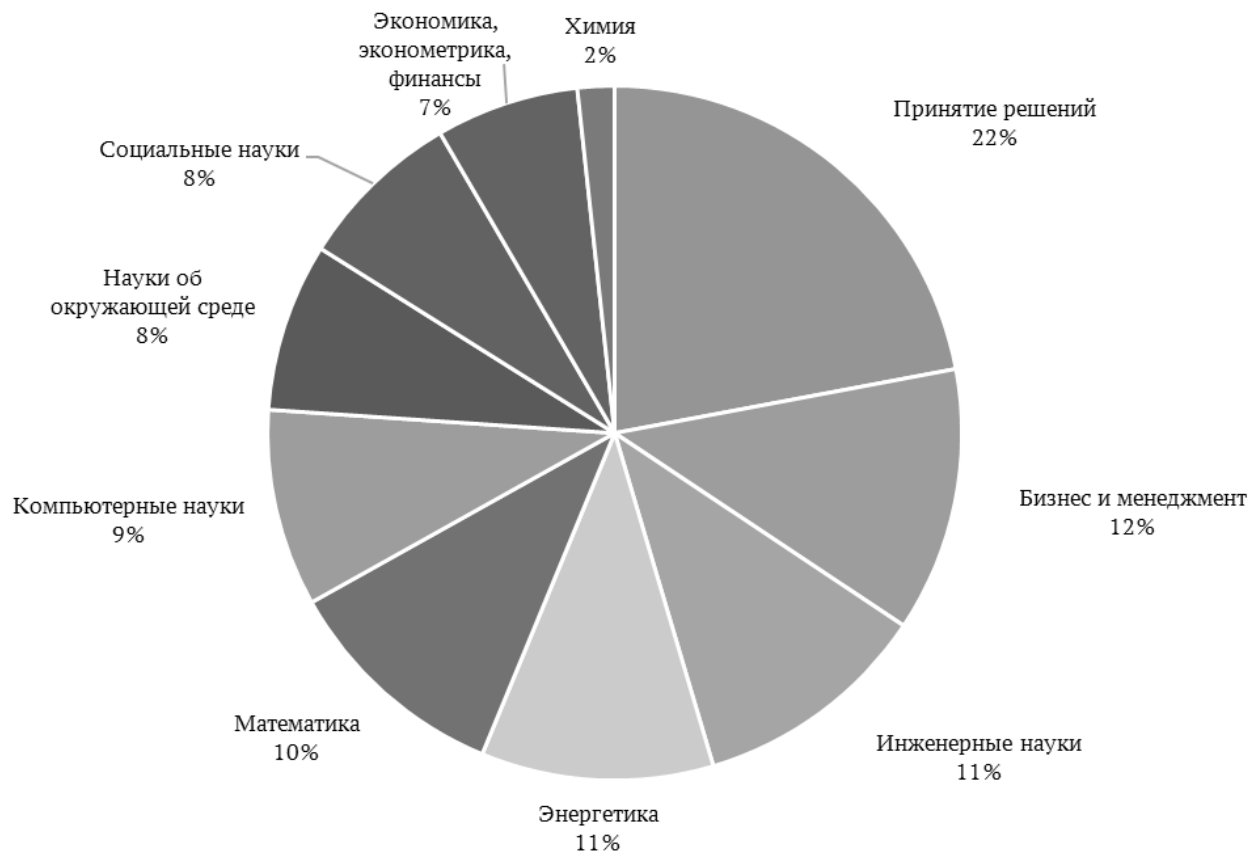
Source: Authoring

Рисунок 2

Распределение публикаций за период 1998–2022 по областям знания

Figure 2

Distribution of publications for 1998–2022 by field of knowledge



Источник: авторская разработка

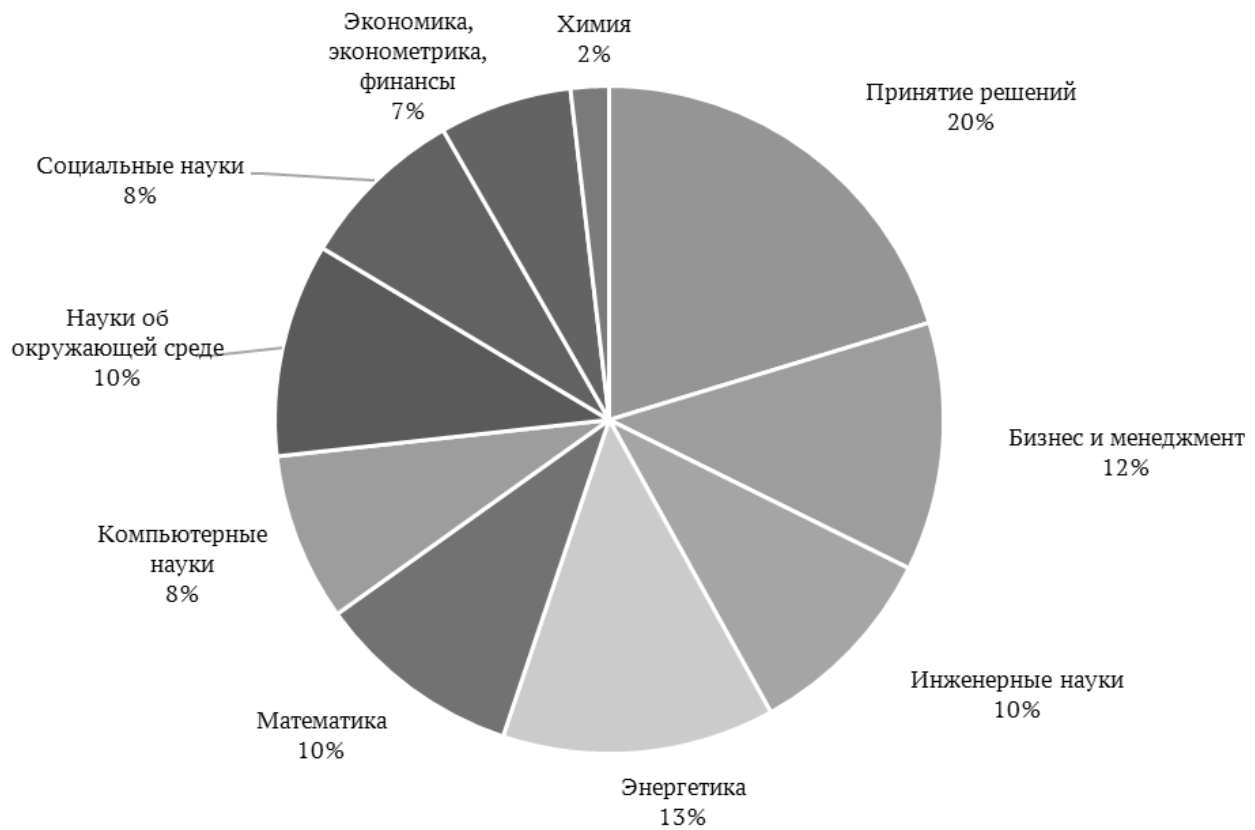
Source: Authoring

Рисунок 3

Распределение публикаций за последние 5 лет по областям знания

Figure 3

Distribution of publications over the past 5 years by field of knowledge

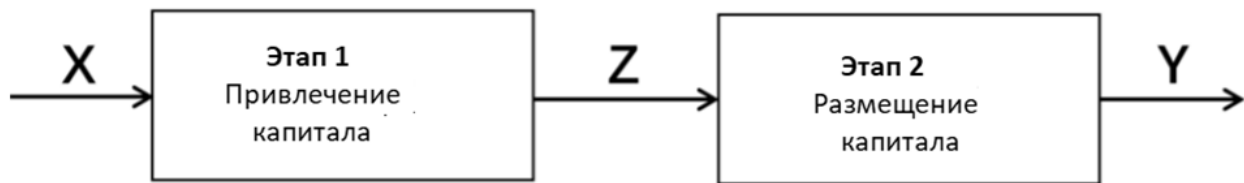


Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 5
Структура банка в сетевой двухэтапной модели DEA

Figure 5
The bank structure in the network two-stage DEA model



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

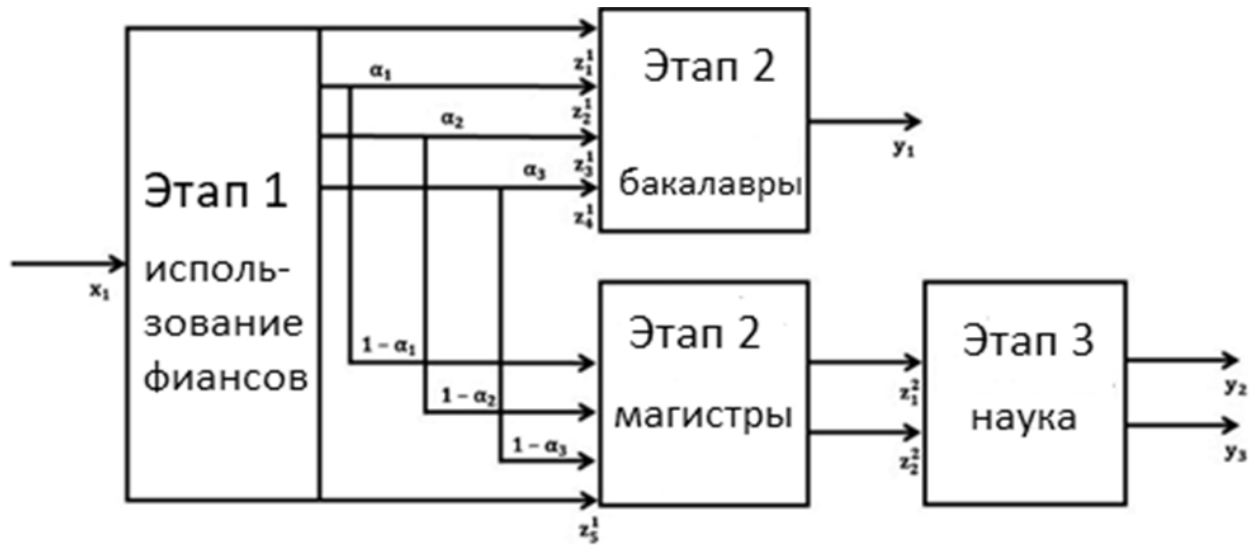
Рисунок 6
Структура процесса разработки внедрения инноваций на высокотехнологичных предприятиях

Figure 6
The structure of the development process for implementation of innovations in high-tech enterprises



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 7**Сетевая структура научно-образовательного процесса в университете****Figure 7****Network structure of the scientific and educational process at the university**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Emrouznejad A., Guo-liang Yang. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2018, vol. 61, pp. 4–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>
2. Panwar A., Olfati M., Pant M., Snasel V. A Review on the 40 Years of Existence of Data Envelopment Analysis Models: Historic Development and Current Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, vol. 29, pp. 5397–5426. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09770-3>
3. Ratner S., Lychev A., Rozhnov A., Lobanov I. Efficiency Evaluation of Regional Environmental Management Systems in Russia Using Data Envelopment Analysis. *Mathematics*, 2021, vol. 9, iss. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/math9182210>
4. Ратнер С.В. Практические приложения анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis) к решению задач экологического менеджмента. М.: ИНФРА-М, 2020. 231 с.
5. John S. Liu, Louis Y.Y. Lu, Wen-Min Lu. Research fronts in data envelopment analysis. *Omega*, 2016, vol. 58, pp. 33–45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.004>
6. Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: The evolution of the state-of-the-art (1978–1995). *Journal of Productivity Analysis*, 1996, vol. 7, pp. 99–137. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00157037>

7. Ta-Wei (Daniel) Kao, Simpson N.C. et al. Relating supply network structure to productive efficiency: A multi-stage empirical investigation. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 259, iss. 2, pp. 469–485.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.008>
8. Coelli T. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models. *Operations Research Letters*, 1998, vol. 23, iss. 3-5, pp. 143–149.
URL: [https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(98\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(98)00036-4)
9. Emrouznejad A., Yang Gl., Khoveyni M., Michali M. Data Envelopment Analysis: Recent Developments and Challenges. In: Salhi S., Boylan J. (eds) *The Palgrave Handbook of Operations Research*. Palgrave Macmillan, Cham, 2022.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96935-6_10.
10. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 245–255. URL: <https://doi.org/10.1080/17509653.2016.1249425>
11. Chiang Kao. Network Data Envelopment Analysis: A Review. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 239, iss. 1, pp. 1–16.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.039>
12. Qiang Cui, Li-Ting Yu. A review of Data Envelopment Analysis in airline efficiency: State-of-the-art and prospects. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, vol. 2021, pp. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/2931734>
13. Izadikhah M. DEA Approaches for Financial Evaluation – A Literature Review. *Advances in Mathematical Finance and Applications*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 1–36.
URL: <https://doi.org/10.22034/amfa.2021.1942092.1639>
14. Zhou Haibo, Yang Yi, Chen Yao, Zhu Joe. Data Envelopment Analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 264, iss. 1, pp. 1–16.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023>
15. John S. Liu, Louis Y.Y. Lu, Wen-Min Lu, Bruce J.Y. Lin. Data Envelopment Analysis 1978–2010: A citation-based literature survey. *Omega*, 2013, vol. 41, iss. 1, pp. 3–15.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.006>
16. Gattoufi S., Oral M., Reisman A. et al. Data Envelopment Analysis literature: A bibliography update (1951–2001). *Socio-Economic Planning Sciences*, 2004, vol. 38, pp. 159–229. URL: [https://doi.org/10.1016/S0038-0121\(03\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0121(03)00023-5)
17. Huang Xiang, Paramaiah Ch, Muhammad Atif Nawaz et al. Integration and economic viability of fueling the future with green hydrogen: An integration of its determinants

- from renewable economics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 77, pp. 38145–38162. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.067>
18. Harpreet Kaur, Surya Prakash Singh. Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. *International Journal of Production Economics*, 2021, vol. 231, no. 107830. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107830>
19. Zhu Qingyuan, Wu Jie, Ji Xiang, Li Feng. A simple MILP to determine closest targets in non-oriented DEA model satisfying strong monotonicity. *Omega*, 2018, vol. 79, pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.003>
20. Contreras I. A review of the literature on DEA models under common set of weights. *Journal of Modelling in Management*, 2020, vol. 15, iss. 4, pp. 1277–1300. URL: <https://doi.org/10.1108/JM2-02-2019-0043>
21. Henriques I.C., Sobreiro V.A. Kimura H., Mariano E.B. Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 161, no. 113632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113632>
22. Hirofumi Fukuyama, Matousek R. Modelling bank performance: A network DEA approach. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 259, iss. 2, pp. 721–732. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.044>
23. Haitao Li, Jie Xiong, Jianhui Xie, Zhongbao Zhou et al. A unified approach to efficiency decomposition for a two-stage network DEA model with application of performance evaluation in banks and sustainable product design. *Sustainability*, 2019, vol. 11, iss. 16. URL: <https://doi.org/10.3390/su11164401>
24. Tavana M., Kaveh Khalili-Damghani et al. Efficiency decomposition and measurement in two-stage fuzzy DEA models using a bargaining game approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 118, pp. 394–408. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.010>
25. Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J. A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 99, iss. 1, pp. 213–230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.11.005>
26. Xiaoyang Zhou, Zhongwen Xu, Jian Chai et al. Efficiency evaluation for banking systems under uncertainty: A multi-period three-stage DEA model. *Omega*, 2019, vol. 85, pp. 68–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.012>
27. Tai-Hsin Huang, Kuan-Chen Chen, Chung-I Lin. An extension from network DEA to copula-based network SFA: Evidence from the U.S. commercial banks in 2009. *The*

- Quarterly Review of Economics and Finance*, 2018, vol. 67, pp. 51–62.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.qref.2017.04.007>
28. Moheb-Alizadeh H., Handfield R. An integrated chance-constrained stochastic model for efficient and sustainable supplier selection and order allocation. *International Journal of Production Research*, 2018, vol. 56, iss. 21, pp. 6890–6916.
URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1413258>
29. Chodakowska E., Nazarko J. Network DEA Models for Evaluating Couriers and Messengers. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 182, pp. 106–111.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.130>
30. Amirkhan M., Didekhani H., Khalili-Damghani K., Hafezalkotob A. Measuring Performance of a Three-Stage Network Structure Using Data Envelopment Analysis and Nash Bargaining Game: A Supply Chain Application. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2018, vol. 17, iss. 5, pp. 1429–1467.
URL: <https://doi.org/10.1142/S0219622018500426>
31. Taliva Badiezadeh, Reza Farzipoor Saen, Tahmoures Samavati. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 98, pp. 284–290.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.003>
32. Shokri Kahi V., Yousefi S., Shabanpour H., Farzipoor Saen R. How to evaluate sustainability of supply chains? A dynamic network DEA approach. *Industrial Management & Data Systems*, 2017, vol. 117, iss. 9, pp. 1866–1889.
URL: <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2016-0389>
33. Arteaga F.J.S., Tavana M., Di Caprio D., Toloo M. A dynamic multi-stage slacks-based measure Data Envelopment Analysis model with knowledge accumulation and technological evolution. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 278, iss. 2, pp. 448–462. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.008>
34. Xionghe Qin, Debin Du, Mei-Po Kwan. Spatial spillovers and value chain spillovers: evaluating regional R&D efficiency and its spillover effects in China. *Scientometrics*, 2019, vol. 119, iss. 2, pp. 721–747. URL: <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03054-7>
35. Ajirlo S.F., Amirteimoori A., Kordrostami S. Two-stage additive integer-valued data envelopment analysis models: A case of Iranian power industry. *Journal of Modelling in Management*, 2019, vol. 14, iss. 1, pp. 199–213.
URL: <https://doi.org/10.1108/JM2-12-2017-0132>
36. Bin Zhang, Yuan Luo, Yung-Ho Chiu. Efficiency evaluation of China's high-tech industry with a multi-activity network Data Envelopment Analysis approach. *Socio-*

- Economic Planning Sciences*, 2019, vol. 66, pp. 2–9.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.07.013>
37. Xiafei Chen, Zhiying Liu, Qingyuan Zhu. Performance evaluation of China's high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain. *Technovation*, 2018, vol. 74–75, pp. 42–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2018.02.009>
38. Linyan Zhang, Kun Chen. Hierarchical network systems: An application to high-technology industry in China. *Omega*, 2019, vol. 82, pp. 118–131.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.12.007>
39. Liuguo Shao, Xiao Yu, Chao Feng. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network Data Envelopment Analysis. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 247, pp. 551–560.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.099>
40. Lin Zhang, Linlin Zhao, Yong Zha. Efficiency evaluation of Chinese regional industrial systems using a dynamic two-stage DEA approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2021, vol. 77, no. 101031. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101031>
41. Reza Kiani Mavi, Reza Farzipoor Saen, Goh M. Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, vol. 144, pp. 553–562.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.035>
42. Tajbakhsh A., Hassini E. Evaluating sustainability performance in fossil-fuel power plants using a two-stage Data Envelopment Analysis. *Energy Economics*, 2018, vol. 74, pp. 154–178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.032>
43. Jiqiang Zhao, Xianhua Wu, Ji Guo, Chao Gao. Allocation of SO₂ emission rights in city agglomerations considering cross-border transmission of pollutants: A new network DEA model. *Applied Energy*, 2022, vol. 325, no. 119927.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119927>
44. Awadh Pratap Singh, Shiv Prasad Yadav. A Two-stage Network Data Envelopment Analysis: An Education Sector Application. *arXiv:2206.01561v1*.
URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.01561>
45. Guo-liang Yang, Hirofumi Fukuyama, Yao-yao Song. Measuring the inefficiency of Chinese research universities based on a two-stage network DEA model. *Journal of Informetrics*, 2018, vol. 12, iss. 1, pp. 10–30.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.11.002>
46. Tavares R.S., Angulo-Meza L., Sant'Anna A.P. A proposed multistage evaluation approach for Higher Education Institutions based on network Data Envelopment

- Analysis: A Brazilian experience. *Evaluation and Program Planning*, 2021, vol. 89, no. 101984. URL: <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2021.101984>
47. Dominikos M.K., Beullens P., Kyrgiakos L.S., Klein J. Measurement and evaluation of multi-function parallel network hierarchical DEA systems. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, vol. 84, no. 101428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101428>
48. Khushalani J., Ozcan Y.A. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DEA). *Socio-Economic Planning Sciences*, 2017, vol. 60, pp. 15–23.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.009>
49. Pereira M.A., Ferreira D.C., Figueira J.R., Marques R.C. Measuring the efficiency of the Portuguese public hospitals: A value modelled network Data Envelopment Analysis with simulation. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 181, no. 115169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115169>
50. Ruchuan Zhang, Qian Wei, Aijun Li, LiYing Ren. Measuring efficiency and technology inequality of China's electricity generation and transmission system: A new approach of network Data Envelopment Analysis prospect cross-efficiency models. *Energy*, 2022, vol. 246, no. 123274. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123274>
51. Tavassoli M., Ketabi S., Ghandehari M. A novel fuzzy network DEA model to evaluate efficiency of Iran's electricity distribution network with sustainability considerations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 52, part C, no. 102269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102269>
52. Ming-Miin Yu, Kok Fong See. Evaluating the efficiency of global airlines: A new weighted SBM-NDEA approach with non-uniform abatement factor. *Research in Transportation Business & Management*, 2023, vol. 46, no. 100860. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100860>
53. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 245–255. URL: <https://doi.org/10.1080/17509653.2016.1249425>
54. Dao Le Trang Anh, Gan C. Profitability and marketability efficiencies of Vietnam manufacturing firms: An application of a multi-stage process. *International Journal of Social Economics*, 2020, vol. 47, iss. 1, pp. 54–71. URL: <https://doi.org/10.1108/IJSE-05-2019-0321>
55. Zegordi S.H., Omid A. Efficiency assessment of Iranian Handmade Carpet Company by network DEA. *Scientia Iranica*, 2017, vol. 25, iss. 1, pp. 483–491. URL: <https://doi.org/10.24200/sci.2017.20006>

56. *Chuanzhong Yin, Wenhui Gao, Zhongheng Li et al.* Improved two-stage DEA model: An application to logistics efficiency evaluation enterprise in Xiamen, China. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2019, vol. 15, iss. 2, pp. 535–549. URL: <https://doi.org/10.24507/ijicic.15.02.535>
57. *He Huang, Shanling Li, Yu Yu.* Evaluation of the allocation performance in a fashion retail chain using Data Envelopment Analysis. *The Journal of the Textile Institute*, 2019, vol. 110, iss. 6, pp. 901–910.
URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1532376>
58. *Saen R.F., Karimi B., Fathi A.* Assessing the sustainability of transport supply chains by double frontier network Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 354, no. 131771.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131771>
59. *Omrani H., Emrouznejad A., Shamsi M., Fahimi P.* Evaluation of insurance companies considering uncertainty: A multi-objective network Data Envelopment Analysis model with negative data and undesirable outputs. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, vol. 82, part B, no. 101306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101306>
60. *Pereira M.A., Dinis D.C., Ferreira D.C. et al.* A network Data Envelopment Analysis to estimate nations' efficiency in the fight against SARS-CoV-2. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 210, no. 118362.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118362>

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

PRACTICAL APPLICATIONS OF NETWORK DATA ENVELOPMENT ANALYSIS

Svetlana V. RATNER ^{a,*},

Artem M. SHAPOSHNIKOV ^b

^a Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
Moscow, Russian Federation
lanaratner@ipu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>

^b Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
Moscow, Russian Federation
horen25@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3720-2725>

* Corresponding author

Article history:

Article No. 105/2023
Received 30 March 2023
Received in revised form
10 April 2023
Accepted 18 April 2023
Available online
30 May 2023

JEL classification: C61,
C67, O4

Keywords: Network Data
Envelopment Analysis,
staged modeling, partial
efficiency, system
efficiency, network
structure

Abstract

Subject. The article considers a methodology for assessing the comparative effectiveness of the activity of homogeneous economic agents, i.e. Data Envelopment Analysis.

Objectives. The focus is on systematization and classification of modern practical applications of network Data Envelopment Analysis, identification of types of additional information that can be extracted from solving problems of network DEA for the strategic management of companies/organizations.

Methods. The study rests on systematic literature review.

Results. At present, multi-stage DEA models are most actively used to model and evaluate the performance of banks, supply chains consisting of a “supplier-manufacturer-distributor” link, innovative and high-tech companies (or territories), and companies whose activities are regulated by strict environmental standards. Least of all, multi-stage DEA models are so far used to model consumer behavior as a sequential process consisting of many stages, which is explained by the underdevelopment of approaches to measuring consumer behavior factors.

Conclusions. The main difference between the types of multi-stage network models is the absence or presence of common inputs for several stages, which are divided in a certain proportion between the stages (subsystems). This factor significantly affects the type of optimization model and approaches to its solution. The presence of common inputs gives rise to the need to solve an additional optimization problem for the distribution of resources between subsystems.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2023

Please cite this article as: Ratner S.V., Shaposhnikov A.M. Practical Applications of Network Data Envelopment Analysis. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2023, vol. 22, iss. 5, pp. 800–828. <https://doi.org/10.24891/ea.22.5.800>

Acknowledgments

The study was supported by the Russian Science Foundation (RSF), project № 22-78-10089. URL: <https://rscf.ru/project/22-78-10089/>

References

1. Emrouznejad A., Guo-Liang Yang. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978–2016. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2018, vol. 61, pp. 4–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.008>
2. Panwar A., Olfati M., Pant M., Snasel V. A Review on the 40 Years of Existence of Data Envelopment Analysis Models: Historic Development and Current Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, vol. 29, pp. 5397–5426. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09770-3>
3. Ratner S., Lychev A., Rozhnov A., Lobanov I. Efficiency Evaluation of Regional Environmental Management Systems in Russia Using Data Envelopment Analysis. *Mathematics*, 2021, vol. 9, iss. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/math9182210>
4. Ratner S.V. *Prakticheskie prilozheniya analiza sredy funktsionirovaniya (Data Envelopment Analysis) k resheniyu zadach ekologicheskogo menedzhmenta* [Practical implementation of Data Envelopment Analysis to the problems of environmental management]. Moscow, INFRA-M Publ., 2020, 231 p.
5. John S. Liu, Louis Y.Y. Lu, Wen-Min Lu. Research fronts in data envelopment analysis. *Omega*, 2016, vol. 58, pp. 33–45. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.004>
6. Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: The evolution of the state-of-the-art (1978–1995). *Journal of Productivity Analysis*, 1996, vol. 7, pp. 99–137. URL: <https://doi.org/10.1007/BF00157037>
7. Kao Ta-Wei (Daniel), Simpson N.C. et al. Relating supply network structure to productive efficiency: A multi-stage empirical investigation. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 259, iss. 2, pp. 469–485. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.008>
8. Coelli T. A multi-stage methodology for the solution of orientated DEA models. *Operations Research Letters*, 1998, vol. 23, iss. 3-5, pp. 143–149. URL: [https://doi.org/10.1016/S0167-6377\(98\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6377(98)00036-4)
9. Emrouznejad A., Yang G.L., Khoveyni M., Michali M. Data Envelopment Analysis: Recent Developments and Challenges. In: Salhi S., Boylan J. (eds) *The Palgrave*

- Handbook of Operations Research. Palgrave Macmillan, Cham, 2022.
URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96935-6_10
10. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 245–255. URL: <https://doi.org/10.1080/17509653.2016.1249425>
 11. Chiang Kao. Network Data Envelopment Analysis: A Review. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 239, iss. 1, pp. 1–16.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.039>
 12. Qiang Cui, Li-Ting Yu. A review of Data Envelopment Analysis in airline efficiency: State-of-the-art and prospects. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, vol. 2021, pp. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/2931734>
 13. Izadikhah M. DEA Approaches for Financial Evaluation – A Literature Review. *Advances in Mathematical Finance and Applications*, 2022, vol. 7, iss. 1, pp. 1–36.
URL: <https://doi.org/10.22034/amfa.2021.1942092.1639>
 14. Zhou Haibo, Yang Yi, Chen Yao, Zhu Joe. Data Envelopment Analysis application in sustainability: The origins, development and future directions. *European Journal of Operational Research*, 2018, vol. 264, iss. 1, pp. 1–16.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.06.023>
 15. John S. Liu, Louis Y.Y. Lu, Wen-Min Lu, Bruce J.Y. Lin. Data Envelopment Analysis 1978–2010: A citation-based literature survey. *Omega*, 2013, vol. 41, iss. 1, pp. 3–15.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.006>
 16. Gattoufi S., Oral M., Reisman A. et al. Data envelopment analysis literature: A bibliography update (1951–2001). *Socio-Economic Planning Sciences*, 2004, vol. 38, pp. 159–229. URL: [https://doi.org/10.1016/S0038-0121\(03\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0121(03)00023-5)
 17. Huang Xiang, Paramaiah Ch, Muhammad Atif Nawaz et al. Integration and economic viability of fueling the future with green hydrogen: An integration of its determinants from renewable economics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 77, pp. 38145–38162. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.067>
 18. Harpreet Kaur, Surya Prakash Singh. Multi-stage hybrid model for supplier selection and order allocation considering disruption risks and disruptive technologies. *International Journal of Production Economics*, 2021, vol. 231, no. 107830.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107830>
 19. Zhu Qingyuan, Wu Jie, Ji Xiang, Li Feng. A simple MILP to determine closest targets in non-oriented DEA model satisfying strong monotonicity. *Omega*, 2018, vol. 79, pp. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.003>

20. Contreras I. A review of the literature on DEA models under common set of weights. *Journal of Modelling in Management*, 2020, vol. 15, iss. 4, pp. 1277–1300.
URL: <https://doi.org/10.1108/JM2-02-2019-0043>
21. Henriques I.C., Sobreiro V.A. Kimura H., Mariano E.B. Two-stage DEA in banks: Terminological controversies and future directions. *Expert Systems with Applications*, 2020, vol. 161, no. 113632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113632>
22. Hirofumi Fukuyama, Matousek R. Modelling bank performance: A network DEA approach. *European Journal of Operational Research*, 2017, vol. 259, iss. 2, pp. 721–732. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.044>
23. Haitao Li, Jie Xiong, Jianhui Xie, Zhongbao Zhou et al. A unified approach to efficiency decomposition for a two-stage network DEA model with application of performance evaluation in banks and sustainable product design. *Sustainability*, 2019, vol. 11, iss. 16. URL: <https://doi.org/10.3390/su11164401>
24. Tavana M., Kaveh Khalili-Damghani et al. Efficiency decomposition and measurement in two-stage fuzzy DEA models using a bargaining game approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, vol. 118, pp. 394–408.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.010>
25. Izadikhah M., Tavana M., Di Caprio D., Santos-Arteaga F.J. A novel two-stage DEA production model with freely distributed initial inputs and shared intermediate outputs. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 99, iss. 1, pp. 213–230.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.11.005>
26. Xiaoyang Zhou, Zhongwen Xu, Jian Chai et al. Efficiency evaluation for banking systems under uncertainty: A multi-period three-stage DEA model. *Omega*, 2019, vol. 85, pp. 68–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.05.012>
27. Tai-Hsin Huang, Kuan-Chen Chen, Chung-I Lin. An extension from network DEA to copula-based network SFA: Evidence from the U.S. commercial banks in 2009. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 2018, vol. 67, pp. 51–62.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.qref.2017.04.007>
28. Moheb-Alizadeh H., Handfield R. An integrated chance-constrained stochastic model for efficient and sustainable supplier selection and order allocation. *International Journal of Production Research*, 2018, vol. 56, iss. 21, pp. 6890–6916.
URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1413258>
29. Chodakowska E., Nazarko J. Network DEA Models for Evaluating Couriers and Messengers. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 182, pp. 106–111.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.130>

30. Amirkhan M., Didekhani H., Khalili-Damghani K., Hafezalkotob A. Measuring Performance of a Three-Stage Network Structure Using Data Envelopment Analysis and Nash Bargaining Game: A Supply Chain Application. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2018, vol. 17, iss. 5, pp. 1429–1467. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219622018500426>
31. Taliva Badiezadeh, Reza Farzipoor Saen, Tahmoures Samavati. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. *Computers & Operations Research*, 2018, vol. 98, pp. 284–290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.003>
32. Shokri Kahi V., Yousefi S., Shabanpour H., Farzipoor Saen R. How to evaluate sustainability of supply chains? A dynamic network DEA approach. *Industrial Management & Data Systems*, 2017, vol. 117, iss. 9, pp. 1866–1889. URL: <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2016-0389>
33. Arteaga F.J.S., Tavana M., Di Caprio D., Toloo M. A dynamic multi-stage slacks-based measure Data Envelopment Analysis model with knowledge accumulation and technological evolution. *European Journal of Operational Research*, 2019, vol. 278, iss. 2, pp. 448–462. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.09.008>
34. Xionghe Qin, Debin Du, Mei-Po Kwan. Spatial spillovers and value chain spillovers: Evaluating regional R&D efficiency and its spillover effects in China. *Scientometrics*, 2019, vol. 119, iss. 2, pp. 721–747. URL: <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03054-7>
35. Ajirlo S.F., Amirteimoori A., Kordrostami S. Two-stage additive integer-valued Data Envelopment Analysis models: A case of Iranian power industry. *Journal of Modelling in Management*, 2019, vol. 14, iss. 1, pp. 199–213. URL: <https://doi.org/10.1108/JM2-12-2017-0132>
36. Bin Zhang, Yuan Luo, Yung-Ho Chiu. Efficiency evaluation of China's high-tech industry with a multi-activity network Data Envelopment Analysis approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2019, vol. 66, pp. 2–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.07.013>
37. Xiafei Chen, Zhiying Liu, Qingyuan Zhu. Performance evaluation of China's high-tech innovation process: Analysis based on the innovation value chain. *Technovation*, 2018, vol. 74-75, pp. 42–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2018.02.009>
38. Linyan Zhang, Kun Chen. Hierarchical network systems: An application to high-technology industry in China. *Omega*, 2019, vol. 82, pp. 118–131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.12.007>
39. Liuguo Shao, Xiao Yu, Chao Feng. Evaluating the eco-efficiency of China's industrial sectors: A two-stage network Data Envelopment Analysis. *Journal of Environmental*

Management, 2019, vol. 247, pp. 551–560.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.099>

40. Lin Zhang, Linlin Zhao, Yong Zha. Efficiency evaluation of Chinese regional industrial systems using a dynamic two-stage DEA approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2021, vol. 77, no. 101031.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101031>

41. Reza Kiani Mavi, Reza Farzipoor Saen, Goh M. Joint analysis of eco-efficiency and eco-innovation with common weights in two-stage network DEA: A big data approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, vol. 144, pp. 553–562.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.035>

42. Tajbakhsh A., Hassini E. Evaluating sustainability performance in fossil-fuel power plants using a two-stage data envelopment analysis. *Energy Economics*, 2018, vol. 74, pp. 154–178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.05.032>

43. Jiqiang Zhao, Xianhua Wu, Ji Guo, Chao Gao. Allocation of SO₂ emission rights in city agglomerations considering cross-border transmission of pollutants: A new network DEA model. *Applied Energy*, 2022, vol. 325, no. 119927.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119927>

44. Awadh Pratap Singh, Shiv Prasad Yadav. A Two-stage Network Data Envelopment Analysis: An Education Sector Application. *arXiv:2206.01561v1*.

URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.01561>

45. Guo-liang Yang, Hirofumi Fukuyama, Yao-yao Song. Measuring the inefficiency of Chinese research universities based on a two-stage network DEA model. *Journal of Informetrics*, 2018, vol. 12, iss. 1, pp. 10–30.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.11.002>

46. Tavares R.S., Angulo-Meza L., Sant'Anna A.P. A proposed multistage evaluation approach for Higher Education Institutions based on network Data Envelopment Analysis: A Brazilian experience. *Evaluation and Program Planning*, 2021, vol. 89, no. 101984. URL: <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2021.101984>

47. Dominikos M.K., Beullens P., Kyrgiakos L.S., Klein J. Measurement and evaluation of multi-function parallel network hierarchical DEA systems. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, vol. 84, no. 101428. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101428>

48. Khushalani J., Ozcan Y.A. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using Dynamic Network Data Envelopment Analysis (DEA). *Socio-Economic Planning Sciences*, 2017, vol. 60, pp. 15–23.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.01.009>

49. Pereira M.A., Ferreira D.C., Figueira J.R., Marques R.C. Measuring the efficiency of the Portuguese public hospitals: A value modelled network Data Envelopment Analysis with simulation. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 181, no. 115169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115169>
50. Ruchuan Zhang, Qian Wei, Aijun Li, LiYing Ren. Measuring efficiency and technology inequality of China's electricity generation and transmission system: A new approach of network Data Envelopment Analysis prospect cross-efficiency models. *Energy*, 2022, vol. 246, no. 123274. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123274>
51. Tavassoli M., Ketabi S., Ghandehari M. A novel fuzzy network DEA model to evaluate efficiency of Iran's electricity distribution network with sustainability considerations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 52, part C, no. 102269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102269>
52. Ming-Miin Yu, Kok Fong See. Evaluating the efficiency of global airlines: A new weighted SBM-NDEA approach with non-uniform abatement factor. *Research in Transportation Business & Management*, 2023, vol. 46, no. 100860. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2022.100860>
53. Rezaee M.J., Shokry M. Game theory versus multi-objective model for evaluating multi-level structure by using Data Envelopment Analysis. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2017, vol. 12, iss. 4, pp. 245–255. URL: <https://doi.org/10.1080/17509653.2016.1249425>
54. Dao Le Trang Anh, Gan C. Profitability and marketability efficiencies of Vietnam manufacturing firms: An application of a multi-stage process. *International Journal of Social Economics*, 2020, vol. 47, iss. 1, pp. 54–71. URL: <https://doi.org/10.1108/IJSE-05-2019-0321>
55. Zegordi S.H., Omid A. Efficiency assessment of Iranian Handmade Carpet Company by network DEA. *Scientia Iranica*, 2017, vol. 25, iss. 1, pp. 483–491. URL: <https://doi.org/10.24200/sci.2017.20006>
56. Chuanzhong Yin, Wenhui Gao, Zhongheng Li et al. Improved two-stage DEA model: an application to logistics efficiency evaluation enterprise in Xiamen, China. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2019, vol. 15, iss. 2, pp. 535–549. URL: <https://doi.org/10.24507/ijicic.15.02.535>
57. He Huang, Shanling Li, Yu Yu. Evaluation of the allocation performance in a fashion retail chain using Data Envelopment Analysis. *The Journal of the Textile Institute*, 2019, vol. 110, iss. 6, pp. 901–910. URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1532376>

58. Saen R.F., Karimi B., Fathi A. Assessing the sustainability of transport supply chains by double frontier network Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 354, no. 131771.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131771>
59. Omrani H., Emrouznejad A., Shamsi M., Fahimi P. Evaluation of insurance companies considering uncertainty: A multi-objective network Data Envelopment Analysis model with negative data and undesirable outputs. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2022, vol. 82, part B, no. 101306. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101306>
60. Pereira M.A., Dinis D.C., Ferreira D.C. et al. A network Data Envelopment Analysis to estimate nations' efficiency in the fight against SARS-CoV-2. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 210, no. 118362.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118362>

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.`