

На правах рукописи



Покушко Мария Валериевна

**МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Ступина Алена Александровна
Официальные оппоненты:	Кривоножко Владимир Егорович , доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» Мицель Артур Александрович , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Защита состоится «24» ноября 2024 года в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.403.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, зал заседаний Диссертационного совета, ауд. П207.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» и на официальном сайте <https://www.sibsau.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 660037, Россия, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева), Диссертационный совет.

E-mail: dissovet@sibsau.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Панфилов Илья Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Понятие эффективности является ключевым при описании процесса функционирования сложных производственных систем. Изменчивость показателей внешней среды, ограниченность ресурсов, сложность управления производственными системами затрудняют настройку и поддержание оптимальных параметров их функционирования. Вследствие этого возникает необходимость разработки и применения новых методов и инструментов исследования эффективности функционирования сложных производственных систем (далее – объектов).

На сегодняшний день в научной литературе представлен устоявшийся набор классических методов и алгоритмов исследования эффективности функционирования систем, которые достаточно успешно применяются для решения различных практических задач. Известные методы и алгоритмы исследования эффективности имеют свои особенности, сужающие возможности их применения, так как одни из них позволяют исследовать эффективность функционирования системы только с одним выходом, а другие, работая с несколькими выходами, позволяют оценивать только «относительную» эффективность (эффективность вычисляется относительно объектов исследуемой выборки). В этом случае оценка эффективности функционирования производится относительно лучших объектов (наиболее эффективных) некоторой выборки (набора объектов), поэтому при ее расширении возможно уменьшение значений показателей эффективности объектов, присутствовавших в ней ранее, новые объекты могут оказаться лучше (эффективнее), чем те, что были лучшими в исходной группе объектов. Кроме этого, существующие методы не позволяют применять их для исследования малых выборок объектов. Следовательно, представляется целесообразной разработка методов и алгоритмов, позволяющих решить проблему «относительности» оценок эффективности и обеспечивающих корректные результаты при работе с малыми выборками исследуемых объектов.

Степень разработанности темы. Проблемы исследования эффективности функционирования систем являются актуальными для ученых разных стран, поэтому в настоящее время существуют разнообразные методы, модели и алгоритмы исследования эффективности, применяемые в разных областях науки.

Значительная часть работ посвящена исследованиям эффективности на основе метода производственных функций, метода стохастической границы – Stochastic Frontier Analysis (SFA), анализа среды функционирования (АСФ) - Data Envelopment Analysis (DEA), и их применению в различных сферах. В работах В.Е. Кривоножко, А.В. Лычева, А. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes, R.D. Banker, рассмотрены базовые методы. Основные модификации методов описаны в работах Е.П. Моргунова, Ю.В. Федотова, О.Н. Моргуновой, С. Wang, X. Nguyen, Y. Wang, A. Emrouznejad, G. Yang и других.

В данном направлении также работали отечественные исследователи: Ф.П. Тарасенко, А.Н. Антамошкин, А.А. Мицель, Р.В. Ерженин, А.Н. Порунов и др. Из зарубежных работ можно выделить труды следующих ученых: M.J. Farrell, L.M. Seiford, K. Tone K., T. Coelli, M. Branda, M. Kopa и др. Последние модификации метода DEA в основном направлены на использование кластерного анализа и нечеткой логики.

Ограничения и недостатки существующих методов создают потребность в создании нового метода исследования эффективности на основе анализа среды функционирования. В диссертации предложен метод анализа расширенной выборки (АРВ) и алгоритмы, предназначенные для исследования эффективности функционирования сложных производственных систем и дающие возможность повысить эффективность за счет регулирования значений входов и выходов объектов в

соответствии с эталонными результатами работы объектов при заданных ограничениях, а также позволяют работать с малой выборкой объектов (объем выборки $(n) \leq 30$).

Объектом исследования является процесс исследования эффективности функционирования сложных производственных систем (объектов), рассматриваемых по принципу «черного ящика».

Предметом исследования является подход к формированию анализируемой выборки, представленной набором значений параметров входов и выходов при исследовании эффективности объектов.

Цель работы состоит в повышении точности и обоснованности оценок эффективности функционирования объектов за счет проектирования эталонных объектов и регулирования значений параметров входов и выходов исследуемых объектов.

Поставленная цель определила следующие **задачи**.

1. Проанализировать основные методы, применяемые для исследования эффективности функционирования объектов, недостатки и ограничения данных методов: ограничение в виде единственного выхода при вычислении показателя эффективности, недостаток вычисления «относительной» эффективности при наличии нескольких выходов и недостаток требуемого количества наблюдений при вычислении эффективности.

2. Разработать метод анализа расширенной выборки объектов (метод АРВ) для исследования эффективности объектов, который позволяет снизить влияние недостатков и позволяет повысить показатели эффективности исследуемых объектов.

3. Разработать комплекс алгоритмов поддержки принятия решений, направленный на повышение эффективности функционирования объектов, позволяющий поэтапно осуществлять использование предложенного метода АРВ в процессе принятия решений при исследовании эффективности функционирования сложных производственных систем.

4. Реализовать разработанный комплекс алгоритмов в составе системы поддержки принятия решений, направленной на повышение эффективности функционирования объектов, используемой при исследовании эффективности объектов и реализующей применение предложенного метода АРВ в автоматизированном режиме.

5. Предложить адаптацию метода АРВ и алгоритмов для практического использования при исследовании эффективности объектов.

6. Оценить эффективность предложенного метода АРВ относительно других известных методов исследования эффективности значений входов и выходов для решения задач повышения эффективности функционирования объектов, в том числе при работе с малой выборкой.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались методы системного анализа, математического программирования и математической статистики, регрессионного анализа, DEA, теории принятия решений, теории баз данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Впервые предложен метод предобработки данных исследуемой выборки объектов на основе искусственного расширения набора данных об объектах – метод АРВ – для использования в составе метода DEA. В отличие от других методов он позволяет исследовать эффективность функционирования объектов с более чем одним выходом, снижая недостаток относительности вычисления эффективности (эффективность вычисляется относительно объектов исследуемой выборки), а также позволяет работать с малой выборкой объектов.

2. Разработан новый алгоритм выбора условий и ограничений для исследования эффективности сложных производственных систем методом АРВ, в отличие от других, позволяющий накладывать ограничения на значения параметров входов и выходов в зависимости от изменения показателей внешней и внутренней среды функционирования и цели ЛПР.

3. Разработан новый алгоритм формирования наборов значений параметров входов и выходов исследуемых объектов и поиска эталонных объектов, позволяющий сформировать диапазон потенциально возможных значений параметров входов и выходов исследуемых объектов при заданных ограничениях и определить их эффективность.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в том, что расширен спектр инструментов решения задач исследования эффективности систем в виде нового метода АРВ и алгоритмов для исследования эффективности функционирования сложных производственных систем. Получены новые знания о повышении эффективности анализа и управления сложными производственными системами за счет восстановления отсутствующих данных выборки исследуемых объектов. Метод АРВ расширяет исследуемую выборку за счет формирования потенциально возможных значений входов и выходов при функционировании сложных производственных систем в соответствии с заданными ограничениями и целью ЛПР. Разработка метода АРВ и комплекса алгоритмов поддержки принятия решений являются существенным вкладом в развитие методов и алгоритмов исследования эффективности функционирования сложных производственных систем.

Практическая ценность работы и реализация полученных результатов.

Результаты диссертационного исследования могут быть применены для исследования эффективности сложных производственных систем в различных областях науки и производства.

Предложенные в диссертационной работе метод АРВ, алгоритмы и разработанная система поддержки принятия решений (СППР) применены на практике в сфере жилищно-коммунального хозяйства и бытового обслуживания населения. Вырабатываются решения по осуществлению повышения эффективности функционирования системы централизованного коммунального теплоснабжения осуществляется в соответствии с целью ЛПР и ограничениями системы за счет поиска эталонных значений параметров входов и выходов работы теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и котельных, таких как: располагаемая тепловая мощность оборудования, расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию, отпуск тепловой энергии в сеть, масса выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (далее масса выброса).

Метод АРВ, алгоритмы и разработанная СППР применены в сфере здравоохранения, а именно для лечебно-профилактических учреждений. Вырабатываются решения по осуществлению повышения эффективности функционирования социальной системы отрасли здравоохранения осуществляется в соответствии с целью ЛПР и ограничениями системы за счет поиска эталонных значений параметров входов и выходов работы лечебно-профилактических учреждений, таких как число больничных коек, численность врачей, численность среднего медицинского персонала и ожидаемая продолжительность жизни при рождении.

Диссертационная работа и разработанная СППР были подготовлены в ходе работы над грантом РФФИ № 20-37-90013 и грантом Правительства РФ № 075-15-2022-1121. Результаты диссертационной работы и разработанная СППР применены в системе централизованного коммунального теплоснабжения, а именно для котельных и ТЭЦ, что

подтверждается актом внедрения в системе централизованного коммунального теплоснабжения г. Красноярск. Получено свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2023680119 от 26.09.2023 г.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации: п. 4. «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»; п. 9. «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Метод АРВ, расширяющий исследуемую выборку путем формирования в соответствии с заданными ограничениями и целью ЛПР потенциально возможных значений входных и выходных переменных оцениваемых объектов с помощью построения множественной регрессионной модели, позволяет рассчитать показатели эффективности и рекомендуемые значения входных и выходных переменных этих объектов, в том числе при работе с малой выборкой. Эти результаты используются ЛПР для принятия решений при исследовании эффективности функционирования сложных производственных систем и способствуют улучшению показателей эффективности.

2. Разработанный комплекс алгоритмов поддержки принятия решений позволяет реализовать метод АРВ для применения при исследовании эффективности сложных производственных систем в автоматизированном режиме и способствует улучшению показателей эффективности.

3. Адаптация метода АРВ и алгоритмов для их практического использования дает возможность производить расчеты и улучшать значения входов и выходов работы предприятий (на примере ТЭЦ и котельных, а также медицинских учреждений) на основе значений входов и выходов эталонных объектов, позволяя ЛПР принимать более обоснованные решения при исследовании эффективности работы сложных производственных систем.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– XVI – XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: «Перспектив Свободный» (г. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2020 – 2023 г.);

– XXIV – XXVI Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (г. Красноярск, Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2020 – 2023 г.);

– The III Doctoral Consortium in Computer Science / III Jornadas de Investigación Predoctoral en Ingeniería Informática (JIPII 2023), in the University of Cadiz, Spain, on 15th June, 2023;

– The workshop «Hybrid methods of modeling and optimization in complex systems» (HMMOCS-2022, HMMOCS-2023), 2022-2023 in Krasnoyarsk, Russia;

– International Scientific Conference «ICMSIT-2020: Metrological Support of Innovative Technologies», 2020 in Saint Petersburg - Krasnoyarsk, Russia;

Основные положения диссертационной работы и работа в целом обсуждались на научных семинарах кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (2022–2023 г.), а также на научных семинарах лаборатории «Гибридные методы

моделирования и оптимизации в сложных системах» Сибирского федерального университета (2022–2023 г.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 13 научных работ, из них 2 работы в изданиях, включенных в список рекомендованный ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, 8 работ в изданиях, включенных в список из систем цитирования Web of Science, Scopus (из них 3 работы в журналах Q2) и 3 работы, включенные в список РИНЦ. На одну программную систему, разработанную в ходе диссертационного исследования, получено свидетельство Роспатента. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: [1,2,3,11,12] – метод APB и комплекс алгоритмов исследования эффективности методом APB; [4–10,13] – алгоритм исследования эффективности системы централизованного коммунального теплоснабжения при использовании анализа среды функционирования; [14] – система поддержки принятия решения для исследования эффективности сложных производственных систем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников (193 наименований) и двух приложений. Текст диссертации изложен на 142 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены основные проблемы, возникающие при исследовании эффективности сложных производственных систем в различных предметных областях, таких как сфера жилищно-коммунального хозяйства и бытового обслуживания населения, сфера здравоохранения и другие. Проведен анализ методов, применяемых для проведения таких исследований. Показаны различия в применяемых методах.

Проведенный в работе анализ показал, что есть ряд значительных недостатков и ограничений существующих методов. Одни из методов позволяют исследовать эффективность функционирования системы только с одним выходом, а другие, работая с несколькими выходами, позволяют оценивать только «относительную» эффективность (эффективность вычисляется относительно объектов исследуемой выборки). В этом случае оценка эффективности функционирования производится относительно лучших объектов (наиболее эффективных) некоторой выборки (набора объектов), поэтому при ее расширении возможно уменьшение значений показателей эффективности объектов, присутствовавших в ней ранее, новые объекты могут оказаться лучше (эффективнее), чем те, что были лучшими в исходной группе объектов. Кроме этого, существующие методы имеют ограничения, не позволяющие применять их для исследования малых выборок объектов. На основании сравнительного анализа основных известных методов исследования эффективности были выявлены методы, имеющие преимущества и позволяющие получать лучшие результаты при практическом использовании.

Анализ среды функционирования (русскоязычное название, предложенное научной школой профессора В.Е. Кривоножко) или на английском – Data Envelopment Analysis (DEA) является математическим методом, дает возможность анализировать несколько выходов и позволяет не только исследовать эффективность, но и вычислять рекомендуемые значения входов и выходов для неэффективных объектов, при достижении которых эти объекты стали бы эффективными, что не позволяет

использование других методов. Данные преимущества анализ среды функционирования (далее метод DEA) позволяют сделать обоснованное предположение о перспективности его применения в качестве базового метода для разработки метода APB.

Метод DEA основан на построении «границы эффективности», которая является аналогом производственной функции для случая, когда выпуск не скалярный, а векторный.

Метод имеет ряд недостатков, что затрудняет его практическое использование. Недостатки метода DEA представлены ниже.

1. Рассчитывает только «относительную» эффективность. То есть эффективность определяется относительно лучших (эффективных) объектов конкретной исследуемой выборки. Показатели входов и выходов других объектов настраиваются на основе значений показателей эталонных объектов (лучших объектов из данной выборки, работающих эффективно). Чтобы сформировать эталонную границу эффективности, требуется большое количество экспериментальных данных выборки, что практически не всегда представляется возможным, особенно для сложных производственных систем.

2. Метод DEA имеет ограничения по количеству объектов выборки в соответствии с анализируемым количеством входов и выходов. При этом, если данных выборки достаточно для проведения расчетов, есть риск, что данные по лучшему (наиболее эффективному) объекту не были зафиксированы экспериментально и не попали в исследуемую выборку.

3. Анализ среды функционирования относится к модели «черного ящика» и не учитывает особенности внутренней среды системы. Наложение ограничений по показателям входов и выходов в зависимости от показателей внешней и внутренней среды затруднительно для метода DEA. Это усложняет расчёты, а также увеличивает время на их проведение при использовании нескольких отдельных методов.

В диссертации предложен метод APB для исследования эффективности функционирования сложных производственных систем на основе анализа среды функционирования и проведения регрессионного моделирования имеющейся выборки, построения новой выборки прогнозных значений, формирования расширенной выборки исследуемых объектов и использования метода DEA для оценки эффективности полученной расширенной выборки.

Для преодоления указанных выше ограничений метода DEA ранее уже предлагалось формировать искусственную границу эффективности для ее сопоставления с реальными объектами выборки. Сформировать искусственную границу эффективности означает сформировать матрицы входов X и выходов Y для совокупности объектов, которые будут служить в качестве эталонных объектов. Такую процедуру ранее предлагалось в научных исследованиях проводить с привлечением экспертов и в Super Efficiency Model DEA (в переводе с английского «модель суперэффективности»). Но в данных научных исследованиях не было предложено расширение исследуемой выборки за счет формирования всех потенциально возможных значений входов и выходов при функционировании сложных производственных систем в соответствии с заданными ограничениями за счет построения множественной регрессионной модели.

Описанию предложенного метода APB и его сравнению с другими методами исследования эффективности посвящена **вторая глава диссертации**.

Опишем предложенный метод APB.

Этап 1. Построение регрессионной модели и определение коэффициентов регрессии по имеющейся экспериментальной выборке.

Представим алгоритм построения регрессионной модели и определения коэффициентов регрессии по имеющейся экспериментальной выборке.

Выявляем зависимости между группами числовых переменных X и Y , где $X=(x_1, \dots, x_k)$ – независимые переменные (предикторы, объясняющие переменные), которые влияют на значения $Y=(y_1, \dots, y_m)$ зависимых переменных (откликов, объясняемых переменных).

X – это реальные показатели выборки входов, а Y – реальные показатели выборки выходов, полученные экспериментальным путем.

Решаем уравнения множественной регрессии.

Для оценки параметров уравнения множественной регрессии применяется метод наименьших квадратов (МНК).

Для однозначного отыскания параметров $b_0, b_1, \dots, b_k$ должно выполняться неравенство $n \geq k + 1$, где n – количество наблюдений переменных y и x .

Шаг 2. Метод наименьших квадратов дает наилучшие оценки коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_k$, если выполняется ряд ограничений (предпосылки Гаусса-Маркова).

1) Математическое ожидание случайного отклонения ε_i равно нулю для всех наблюдений $M(\varepsilon_i) = 0, i = 1, 2, \dots, n$.

2) Гомоскедастичность (постоянство дисперсии отклонений). Дисперсия случайных отклонений ε_i постоянна $D(\varepsilon_i) = D(\varepsilon_j) = \sigma^2$ для любых наблюдений i и j .

3) Отсутствие автокорреляции. Случайные отклонения ε_i и ε_j являются независимыми друг от друга для всех $i \neq j$.

4) Случайное отклонение должно быть независимо от объясняющих переменных. Объясняющие переменные не являются случайными величинами.

5) Случайные отклонения имеют нормальное распределение $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$.

Оценивается качество построенной модели, используя показатели корреляции, детерминации, критерий Фишера и т. д. После определения параметров уравнения регрессии, проверки предпосылок МНК и оценки качества модели строится ряд прогнозных значений новой выборки.

Если в процессе проверки и оценки качества модели выявлено невыполнение предпосылок Гаусса-Маркова, то дальнейшая работа с данной выборкой невозможна.

В процессе проведения экспериментов таких случаев не было выявлено. Это может быть объяснено высокой зависимостью между показателями входов и выходов при рассмотрении функционирования системы как процесса «вход – выход», так как объясняющие переменные (входы) не являются случайными величинами и оказывают высокое влияние на зависимые переменные (выходы).

Этап 2. Составление ряда прогнозных значений новой выборки и формирование расширенной выборки.

На основании построенной регрессионной модели и рассчитанных зависимостей изменения Y (выходы) при изменении X (входы) составляется ряд прогнозных значений новой выборки с наложением ограничений на параметры функционирования исследуемых производственных систем. В результате новая выборка прогнозных значений (y'_j, x'_j) и реальная выборка $(y_i, x_i), i = 1, \dots, n$ в совокупности будет составлять расширенную выборку исследуемой производственной системы (y_g, x_g) .

Представим алгоритм составления ряда прогнозных значений новой выборки и формирование расширенной выборки.

Шаг 1. Записываются ограничения по исследуемой системе

$$\begin{aligned} r_j &\leq y'_j \leq z_j \quad j = 1, \dots, m, \\ l_j &\leq x'_j \leq s_j \quad j = 1, \dots, k, \\ (y'_j, x'_j) &\neq (y_i, x_i). \end{aligned} \quad (1)$$

r_j – минимально возможное значение для каждого y'_j для исследуемой системы;

z_j – максимально возможное значение y'_j для исследуемой системы;

l_j – минимально возможное значение x'_j для исследуемой системы;

s_j – максимально возможное значение x'_j для исследуемой системы;

x_i – значения входов реальной выборки;

y_i – значения выходов реальной выборки.

Реальная выборка (y_i, x_i) не входит в новую выборку прогнозных значений (y'_j, x'_j) , так как ее показатели уже известны.

Ограничения задает ЛПР в соответствии с возможностями и ограничениями исследуемых производственных систем (мощность оборудования, ресурсы и т. д.) Метод АРВ позволяет получать либо лучшие результаты, либо не худшие, чем были до использования предложенного метода, так как в дальнейшем оценка эффективности производится из объединенной выборки, в которую в том числе входит реальная выборка. Метод позволяет выработать более обоснованные рекомендации по достижению новых значений показателей входов и выходов. Если в заданные ЛПР ограничения по вводимым данным попадают значения входов и выходов эталонных объектов, то такие сгенерированные объекты будут эффективными и взяты за эталон, а для неэффективных объектов будут выработаны рекомендации по повышению их эффективности. Если значения входов и выходов эталонных объектов уже были в реальной выборке, то тогда реальные эффективные объекты выборки будут взяты за эталон, а для неэффективных объектов будут выработаны рекомендации по повышению их эффективности.

Шаг 2. Задаем величину h_j – шаг изменения каждого $x'_j, j = 1, \dots, k$. Величину шага задает ЛПР в соответствии с возможностями и ограничениями исследуемых производственных систем (мощность оборудования, ресурсы и т. д.).

С учетом ограничения $l_j \leq x'_j \leq s_j$ получаем количество наблюдений c_{x_j} по каждому x'_j

$$c_{x_j} = \left\lfloor \frac{s_j - l_j}{h_j} \right\rfloor, \quad (2)$$

новый набор значений переменной $x'_j = (x'_{1j}, \dots, x'_{c_{x_j}j})$, где: $x'_{1j} = l_j$, $x'_{2j} = l_j + h_j$, $x'_{3j} = l_j + 2h_j, \dots, x'_{c_{x_j}j} = l_j + (c_{x_j} - 1)h_j$.

Вычисляются новые наборы значений переменных для каждого $x'_j, j = 1, \dots, k$, и формируется новая выборка для $X' = (x'_1, \dots, x'_k)$.

Объем новой выборки X' равен $d = \prod_{j=1}^k c_{x_j}$.

Шаг 3. Вычисляются прогнозные значения y'_j , используя построенные на этапе 1 регрессионные модели. В качестве $(x'_1, \dots, x'_k)$ берутся значения новой выборки X' .

В результате формируются значения прогнозной выборки для выходов $Y' = (y'_1, \dots, y'_m)$, объем выборки равен d .

Шаг 4. На этом шаге из выборки $(y'_j, x'_j), j = 1, \dots, d$ убираем значения, совпадающие с исходной выборкой $(y_i, x_i), i = 1, \dots, n$, и значения выборки, для которых не выполняется условие $r_j \leq y'_j \leq z_j$. Обозначим объем оставшейся выборки d' .

Шаг 5. Формируется расширенная выборка.

Новая выборка прогнозных значений (y'_j, x'_j) , $j = 1, \dots, d'$ и реальная выборка (y_i, x_i) , $i = 1, \dots, n$ составляют расширенную выборку (y_g, x_g)

$$(y_g, x_g) = (y_i, x_i) \cup (y'_j, x'_j). \quad (3)$$

Этап 3. Оценка эффективности расширенной выборки методом DEA.

Представим алгоритм оценки эффективности для сформированной расширенной выборки методом DEA.

Шаг 1. В формулу вычисления эффективности метода DEA добавляется расширенная выборка, полученная на предыдущем этапе. Ниже приведены формулы по разным ориентациям модели. При ориентации на вход модель минимизирует значения входных параметров без изменения значений выходных параметров. При ориентации на выход модель максимизирует значения выходных параметров без изменения значений входных параметров.

Этап 3.1. Модель оценки эффективности Charnes-Cooper-Rhodes (CCR) метода DEA, ориентированная на вход. Задача оптимизации для расширенной выборки по модели CCR решается следующим образом:

$$\min_{\theta\lambda}(\theta) \quad (4)$$

при:

$$\begin{aligned} -y_g + Y\lambda &\geq 0, \\ \theta x_g - X\lambda &\geq 0, \\ \lambda &\geq 0. \end{aligned}$$

θ – мера эффективности g -го объекта и будет находиться в диапазоне значений от 0 до 1;

y_g – значения выходов полученной расширенной выборки;

x_g – значения входов полученной расширенной выборки;

λ – вектор констант (весов для y_g, x_g) размерности $n \times 1$.

Целевая функция определяет эффективность функционирования исследуемых объектов, а ограничения в виде системы уравнений позволяют оптимизировать показатели входов и выходов, чтобы определить значения входов и выходов неэффективных объектов для достижения ими эффективности.

Аналогичная задача оптимизации решается n раз, то есть для каждого объекта расширенной выборки.

Этап 3.2. Модель CCR метода DEA, ориентированная на выход. В формулу вычисления эффективности модели CCR метода DEA, ориентированной на выход, добавляется расширенная выборка, полученная на предыдущем этапе

$$\max_{\theta\lambda}(\theta) \quad (5)$$

при:

$$\begin{aligned} -\theta y_g + Y\lambda &\geq 0, \\ x_g - X\lambda &\geq 0, \\ \lambda &\geq 0. \end{aligned}$$

Аналогичная задача решается n раз, то есть для каждого объекта расширенной выборки.

Сравнение предложенного метода APB с другими методами оценки эффективности. В диссертации приведен сравнительный анализ существующих методов исследования эффективности. В автореферате в таблице 1 представлены основные заключительные положения данного анализа.

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов исследования эффективности

Метод	Основные характеристики
Анализ стохастической границы (Stochastic Frontier Analysis (SFA))	Параметрический граничный метод для оценки эффективности на основе формирования стохастической границы производственных возможностей. Позволяет оценивать эффективность функционирования систем только с одним выходом. Учитывает случайные ошибки.
Метод на основе построения производственных функций	Позволяет оценивать эффективность функционирования систем только с одним выходом. Выбор вида производственной функции производится на основе изучения доступных статистических данных и знаний о предметной области. Это не полностью формализованный подход. Исходные данные необходимо преобразовывать. Постулируется определенная функциональная форма границы, ее параметры оцениваются с помощью эконометрических методов. Необходимо выбирать функциональную форму производственного функционала. Требуется сортировка данных по средним.
Анализ среды функционирования (Data Envelopment Analysis (DEA))	Непараметрический граничный метод для оценки эффективности на основе формирования выпуклой оболочки элементов выборки. Позволяет оценивать эффективность функционирования систем с несколькими входами и выходами. Рассчитывает «относительную» эффективность. Эффективность определяется относительно лучших (эффективных) объектов выборки. Не требует определения конкретного вида производственной функции. Преобразования данных не требуется. Возможность измерения данных с разными единицами измерения.
Предложенный метод анализа расширенной выборки (АРВ)	Метод на основе использования регрессионной модели и метода DEA применим для оценки эффективности однородных объектов. Позволяет оценивать эффективность функционирования систем с несколькими входами и выходами. Рассчитывает эффективность относительно всех вероятно возможных значений входов и выходов при заданных ограничениях. Не требует определения конкретного вида производственной функции. Преобразования данных не требуется. Возможность измерения данных с разными единицами измерения.

Таким образом, предложенный метод АРВ имеет следующие основные преимущества перед другими методами исследования эффективности:

- рассчитывает эффективность функционирования сложных систем относительно вероятно возможных значений входов и выходов при заданных ограничениях, в том числе при работе с несколькими выходами;
- позволяет работать с малой выборкой (объем $n \leq 30$);
- позволяет учитывать ограничения по входам и выходам, связанные с возможностями и ограничениями исследуемых производственных систем.

В третьей главе описаны алгоритмы исследования эффективности сложных производственных систем с помощью предложенного метода АРВ. Описана система поддержки принятия решений, адаптированная для использования в сфере жилищно-коммунального хозяйства и бытового обслуживания населения и в сфере здравоохранения для повышения эффективности функционирования сложных производственных систем. Исследована эффективность применения предложенного метода АРВ.

В обобщенном виде алгоритм использования разработанного метода АРВ приведен на рисунке 1.

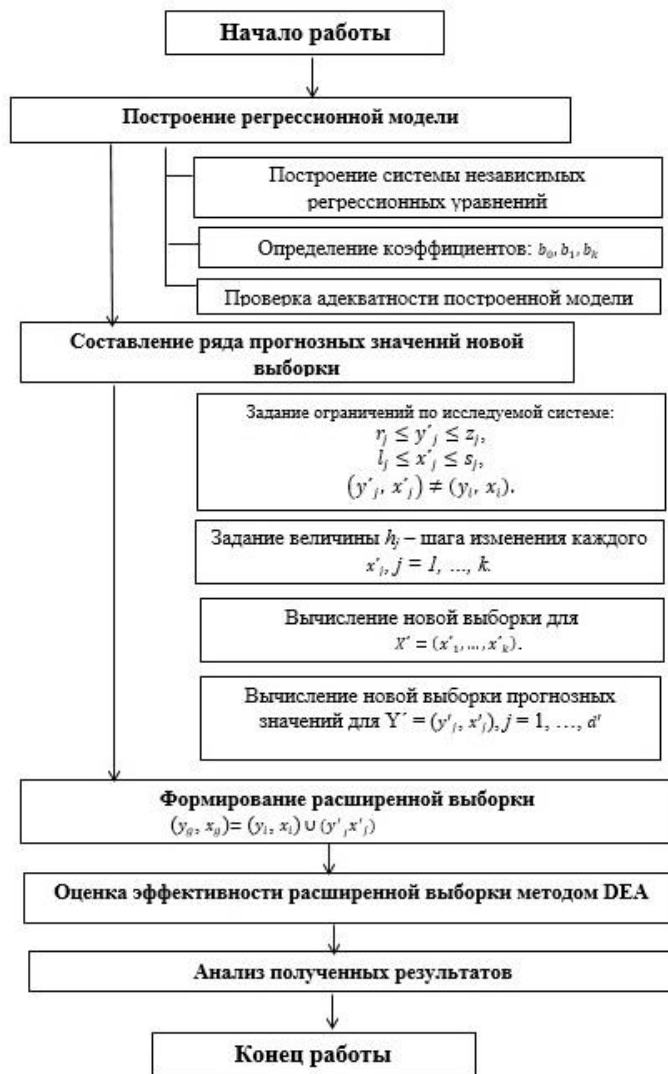


Рисунок 1 – Обобщенный алгоритм исследования эффективности методом АРВ

Архитектура разработанной СППР по представленным выше алгоритмам представлена на рисунке 4.

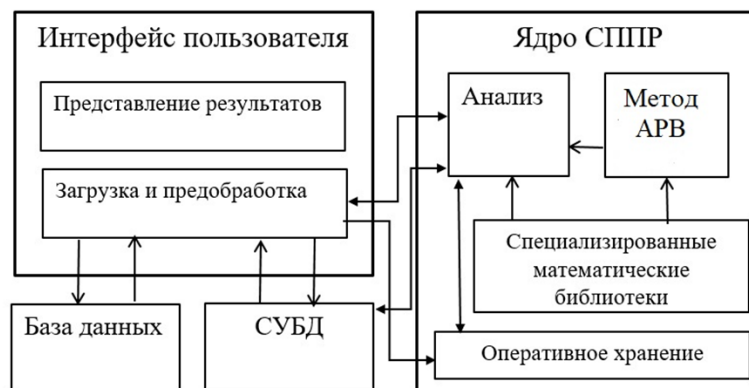


Рисунок 2 – Архитектура разработанной СППР

СППР состоит из ряда взаимосвязанных подсистем и модулей. Программы ядра СППР и интерфейс пользователя разработаны на языке Python. СППР реализует все этапы

проведения исследования эффективности функционирования сложных систем предложенным методом.

Для ЛПР необходимо ввести следующую информацию для расчетов СППР: количество анализируемых объектов реальной выборки; количество входов и выходов; данные входов и выходов исследуемой реальной выборки; ограничения по входам и выходам; минимальный шаг изменения по каждому входу при построении прогнозных значений входов; ориентация модели DEA на вход или выход. На заключительном этапе СППР дает возможность осуществить выгрузку полученных результатов и сохранить их. Формируется отчет с показателями эффективности и со сгруппированными результатами настройки значений входов и выходов по реальной выборке для достижения эффективности, а также приводятся значения входов и выходов найденных эталонных объектов расширенной выборки.

Предложенный метод и алгоритмы исследования эффективности функционирования сложных производственных систем настроены в виде СППР и технических регламентов для использования в системе централизованного коммунального теплоснабжения, а именно для ТЭЦ и промышленных котельных. С их помощью исследована эффективность ТЭЦ и котельных на основе исходных данных, представленных на интернет-сайте Администрации города Красноярска в проекте «Схема теплоснабжения города Красноярска до 2033 года». На основе полученных показателей эффективности их функционирования сделаны выводы о работе исследуемых ТЭЦ и котельных. На основе расчетов эталонных параметров входов и выходов даны рекомендации по их достижению. Получены результаты в виде повышения эффективности работы исследуемой системы централизованного коммунального теплоснабжения за счет достижения показателей входов и выходов эталонных объектов в заданных ограничениях. Приведем в таблице 2 пример сравнения изменений показателей эффективности и показателей входов и выходов исследуемых ТЭЦ до и после использования метода APB.

Таблица 2 – Пример изменения показателей эффективности и показателей входов, исследуемых ТЭЦ до и после использования предложенного метода APB при цели ЛПР – снижение входных показателей

№ ТЭЦ	Показатель эффективности по работе ТЭЦ до использования предложенного метода	Повышение показателя эффективности использования предложенного метода		Показатели входов до использования предложенного метода		Снижение показателей входов после использования предложенного метода	Показатели входов после использования предложенного метода
		ед.	%				
1	0.812	0.116	14.29	x_1	1497	-190.281	1306.719
				x_2	584.6	-76.825	507.775
2	0.656	0.182	27.74	x_1	752	-156.348	595.652
				x_2	384.1	-118.980	265.12
3	0.745	0.172	23.09	x_1	572	-105.652	466.348
				x_2	291.8	-45.453	246.347

В таблице 2 представлены показатели эффективности до и после использования метода APB. Расчеты проводились для реальной выборки из двадцати ТЭЦ. Исследованы два входа: x_1 – располагаемая тепловая мощность оборудования (Гкал/час) и x_2 – расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию (тыс. т. у. т./год), и одного выхода: y – отпуск тепловой энергии в сеть (тыс. Гкал). В таблице представлены данные по трем ТЭЦ. Показатели эффективности находятся в границах от 0 до 1, где показатель эффективности 0 означает, что это неэффективный объект, и показатель эффективности 1 означает, что это эффективный объект.

В диссертации исследована эффективность применения предложенного метода APB относительно других методов. При проведенном анализе выявлено, что эффективные объекты (имеющие показатели эффективности 1) при существующих методах оценки эффективности, становятся неэффективными при использовании предложенного метода APB. Неэффективные объекты (имеющие показатели эффективности меньше 1) при существующих методах исследования эффективности, получают меньшие показатели эффективности при использовании метода APB. В таблице 3 представлены показатели эффективности для трех ТЭЦ, рассчитанные разными методами.

Таблица 3 – Показатели эффективности исследуемых ТЭЦ, рассчитанные разными методами

№ объекта	Метод построения производственных функций	Метод SFA	Метод DEA	Метод APB
1	0.912	0.925	0.945	0.877
2	0.978	1	0.987	0.895
3	0.772	0.723	0.744	0.712

Показатели эффективности лежат в пределах от 0 до 1. Из таблицы 3 видно, что при расчетах методом APB показатели эффективности исследуемых объектов выборки наиболее низкие. Это происходит в связи с тем, что метод строит новую прогнозную границу эффективности на основе расширенной выборки и эффективные объекты могут стать неэффективными. Метод APB позволяет задать более высокие целевые значения показателей входов и выходов исследуемых объектов выборки на основе выявления эффективных объектов в сгенерированной расширенной выборке.

На рисунке 3 покажем графическое распределение показателей эффективности, рассчитанных методом APB и методом DEA.

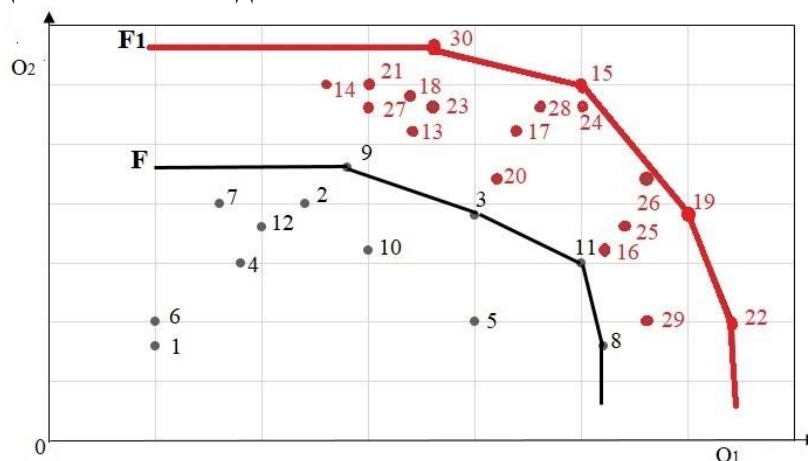


Рисунок 3 – Графическое представление повышения эффективности при использовании метода APB относительно метода DEA

Реальная выборка составляет 12 ТЭЦ. O_1 (отношение 1) = $\frac{x_1}{y}$, O_2 (отношение 2) = $\frac{x_2}{y}$. Черным цветом обозначены точки по реальным ТЭЦ. На данном рисунке представлено распределение точек эффективности исследуемых объектов. На границе эффективности F расположены эффективные ТЭЦ (9, 3, 11, 8), рассчитанные по методу DEA, остальные ТЭЦ (точки с 13 по 30) – это искусственные объекты, сгенерированные методом APB (отмечены красным цветом). Предложенный метод APB позволяет сформировать расширенную выборку. Граница эффективности передвигается в пространстве, формируя границу эффективности F_1 , и ТЭЦ под номерами 9, 3, 11, 8 становятся неэффективными. При использовании метода APB сгенерированы эталонные ТЭЦ под номерами 15, 19, 22, 30, что позволяет повысить эффективность функционирования реальных ТЭЦ, настроив их показатели входов и выходов в соответствии с показателями эталонных ТЭЦ.

На рисунке 4 представлено графическое распределение показателей эффективности, рассчитанных методом APB в сравнении с расчетами модели суперэффективности и с привлечением экспертов.

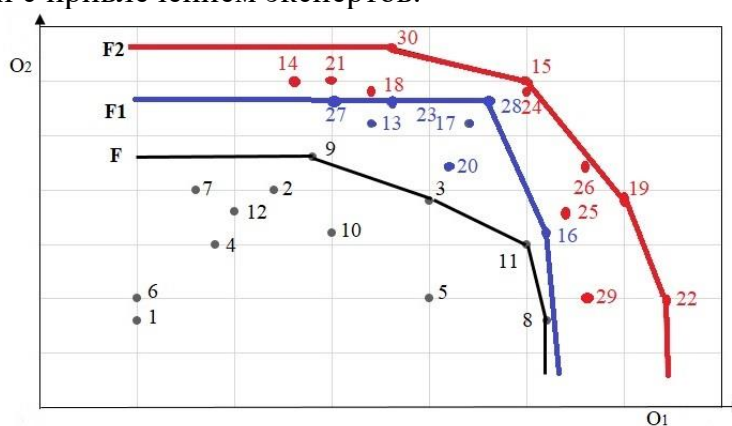


Рисунок 4 – Графическое представление повышения эффективности при использовании метода APB в сравнении с методами суперэффективности и с привлечением экспертов

На рисунке 4 ниже границы эффективности F расположены точки черного цвета, рассчитанные методом суперэффективности. Ниже границы эффективности F_1 расположены точки синего цвета, рассчитанные методом с привлечением экспертов. Метод APB позволяет сформировать расширенную выборку, сгенерировав новые точки (14, 15, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 30), отмеченные красным цветом, и граница эффективности передвигается в пространстве, формируя границу эффективности F_2 . Эффективные ТЭЦ, выявленные методами суперэффективности и с привлечением экспертов, становятся неэффективными при использовании метода APB. Это позволяет повысить эффективность функционирования реальных ТЭЦ, настроив их показатели входов и выходов в соответствии с показателями эталонных ТЭЦ.

В **заключении** сформулированы основные результаты и сделаны выводы по диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертации получены следующие **основные результаты исследования**.

1. Проведенный анализ основных методов исследования эффективности функционирования объектов, выявил основные недостатки и ограничения известных методов при практическом использовании, а именно: вычисление показателя эффективности при единственном выходе, или при работе с несколькими выходами

вычисление «относительной» эффективности и наличие требуемого количества наблюдений для вычисления показателя эффективности.

2. Предложенный метод расширения выборки объектов (метод АРВ) для исследования эффективности объектов позволяет снизить влияние недостатков использования существующих методов и повышать показатели эффективности исследуемых объектов. Он позволяет уменьшить «относительность» вычисления эффективности, которую имеет метод DEA, позволяя повысить эффективность функционирования исследуемых объектов. Метод АРВ позволяет учитывать ограничения по входам и выходам, связанные с возможностями и ограничениями исследуемых производственных систем, в том числе при изменении показателей внешней и внутренней среды, а также работать с малой выборкой.

3. Комплекс алгоритмов поддержки принятия решений позволил реализовать метод АРВ для применения при исследовании эффективности сложных производственных систем в автоматизированном режиме и способствовал улучшению показателей эффективности.

4. Реализация комплекса алгоритмов в системе поддержки принятия решений, используемой при исследовании эффективности объектов, позволила применить предложенный метод АРВ в автоматизированном режиме.

5. Предложенная адаптация метода АРВ и алгоритмов в виде СППР при практическом применении дает возможность производить расчеты и улучшать значения входов и выходов работы предприятий (на примере ТЭЦ и котельных, а также медицинских учреждений) на основе значений входов и выходов эталонных объектов, позволяя ЛПР принимать более обоснованные решения при исследовании эффективности работы сложных производственных систем.

6. В результате анализа сделаны выводы о результативности предложенного метода и целесообразности его использования для повышения эффективности функционирования исследуемых объектов. АРВ метод позволяет получать результаты, не уступающие результатам других известных методов по повышению эффективности функционирования исследуемых объектов. В экспериментах достигнуто улучшение показателей эффективности от 1.12% до 28.34%.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Покушко, М.В. Новый метод оценки и повышения эффективности работы сложных систем / М.В. Покушко, А.А. Ступина // Системы управления и информационные технологии, №3(93), 2023. – С. 86-90. <http://www.sbook.ru/suit/CONTENTS/230300.pdf> (BAK).

2. Покушко, М.В. Применение модели Charnes-Cooper-Rhodes метода Data Envelopment Analysis для повышения эффективности работы котельных и теплоэлектроцентралей / М.В. Покушко, А.А. Ступина, А.А. Истомина, Р.И. Кузьмич // Системы управления и информационные технологии, №4 (90), 2022. – С. 9-12. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.90.4.002>. (BAK).

Публикации в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

3. 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, S. Ezhemanskaya, R. Kuzmich, R. Pokushko // Algorithms, 16, 460, 2023. <https://doi.org/10.3390/a16100460> (Q2).

4. Pokushko, M. Evaluating the efficiency of heat and power systems by the data envelopment analysis method / M. Pokushko, A. Stupina, I. Medina-Bulo, E. Dresvianskii, A. Stupin, R. Kuzmich, I. Ruiga, L. Korpacheva // WSEAS Transactions on Power Systems, 16, 2021. – p. 185-194. <https://doi.org/10.37394/232016.2021.16.19>. (Q2).

5. Pokushko, M. The influence of the heat and power system on the comfort of the living environment / A. Stupina, M. Pokushko, O. Shagaeva, I. Medina-Bulo, E. Dresvianskii, R. Kuzmich, O. Antamoshkin, M. Tsepkova // Transactions on Power Systems, vol. 16, 2021. – p. 344-353. <https://doi.org/10.37394/232016.2021.16.34>. (Q2).

6. Pokushko, M. Slack Based Model for Enterprises' Efficiency Improvement / M. Pokushko, I. Medina-Bulo, R. Kuzmich, R. Pokushko, M. Karaseva, N. Dubovik // Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems, European Proceedings of Computers and Technology, 1, 2023. – p. 351-356. <https://doi.org/10.15405/epct.23021.43>.

7. Pokushko, M. Application of the Data Envelopment Analysis Method for Evaluating Operation of Technical Systems / M. Pokushko, A. Stupina, I. Medina-Bulo, R. Kuzmich, A. Stupin, M. Karaseva // Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems, European Proceedings of Computers and Technology, 1, 2023. – p. 48-54. <https://doi.org/10.15405/epct.23021.6>.

8. Pokushko, M. Applying the Data Envelopment Analysis method for evaluating the efficiency of the complex system operations in fuel and energy companies / M. Pokushko, A. Stupina, I. Medina-Bulo, E. Dresvianskii, E. Mashinets, Zh. Shmeleva // Journal of Physics, Vol. 1515, Is. 5, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052039>.

9. Pokushko, M. Application of data envelopment analysis method for assessment of performance of enterprises in fuel and energy complex / M. Pokushko, A. Stupina, I. Medina-Bulo, E. Dresvianskii, M. Karaseva // Journal of Physics, Vol. 1353, Is. 1, 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012140>.

10. Pokushko, M.V. Dependence of the Informativity of the Formed Patterns on the Quality of the Initial Data Sample / R.I. Kuzmich, A.A. Stupina, A.A. Zavalov, E.S. Dresvianskii, M.V. Pokushko // Lecture Notes in Networks and Systems, Conference Paper, vol. 503 LNNS, 2023. – p. 426-434. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09073-8_37.

Публикации в других изданиях:

11. Покушко, М. В. Использование метода охвата данных для оценки эффективности предприятий / М. В. Покушко, А. А. Ступина, Е. С. Дресвянский, А. О. Ступин, С. М. Антипина // Журнал: Информатика. Экономика. Управление. ООО "Сибирский научный центр ДНИТ", №1, 2022. <https://doi.org/10.47813/2782-5280-2022-1-1-0101-0109> (РИНЦ).

12. Покушко, М.В. Data Envelopment Analysis и его применение / М.В. Покушко, А.А. Ступина, И. Медина-Було, А.О. Ступин // Решетневские чтения. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2022. – С. 446-448. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50021764> (РИНЦ).

13. Покушко, М.В. Применение метода ДЕА для оценки систем теплоснабжения / М.В. Покушко, А.А. Ступина, И. Медина-Було, Е. С. Дресвянский, И.А. Тимофеев // Решетневские чтения. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. – С. 482-483. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47712006> (РИНЦ).

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

14. Покушко, М.В. Свидетельство № 2023680119 Российская Федерация. Информационная система формирования исходных данных для метода ДЕА на базе множественной модели регрессии: № 2023680119: заявл. 31.08.2023: опубл. 26.09.2023 / Покушко М.В., Ступина А.А., Соколов В.А., Кузьмич Р.И. – 1 с.

Подписано к печати _____

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31.