

На правах рукописи

БОЧКАРЕВ Алексей Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФАКТОРОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ**

**2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **ФРЕЙМАН Владимир Исаакович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **ЧЕРНЕНЬКАЯ Людмила Васильевна**
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа киберфизических систем и управления, профессор

КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», кафедра «Автоматизированные системы управления», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань)

Защита диссертации состоится «20» октября 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.14 по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат диссертации разослан «07» июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14
доктор технических наук, доцент

Фрейман
Владимир Исаакович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Предприятиям и организациям для выживания и развития в современных условиях необходимо обеспечить высокое качество управления производственными процессами. Эту задачу призваны решать автоматизированные системы управления (АСУ технологическими процессами, предприятиями). Они характеризуются спектром подсистем (видов обеспечения), в частности, техническое, программное, информационное и пр. (ГОСТ 34.003-90). Для улучшения показателей профильной деятельности предприятий *необходимо совершенствовать технологии и инструменты управления* перечисленными выше подсистемами. Это позволит *повысить эффективность* их работы за счет грамотного и обоснованного распределения и использования ресурсов.

АСУ (MRP, CRM, ERP и т.д.) характеризуются высокой интенсивностью обновления, увеличением объема и расширения спектра поступающей информации, развитием интегрированных процессов управления. Это реализуется за счет внедрения корпоративных информационных систем, информационных и телекоммуникационных технологий, профессиональной подготовки и переподготовки специалистов, внедрения высокопроизводительных средств вычислительной техники и современных информационных технологий. В то же время практика свидетельствует о *неполном задействовании* всех возможностей подсистем АСУ, что позволяет сказать о *недостаточной эффективности* использования их ресурсов. Это обстоятельство осложняется всегда актуальной проблемой согласования постоянного усложнения информационно-технических решений и наличия специалистов, способных и готовых их использовать.

Современные предприятия, как правило, в достаточной степени оснащены средствами вычислительной техники, сетевым оборудованием и системным и прикладным программным обеспечением. При этом можно констатировать явное *противоречие* – многое из вышеперечисленного остается *невостребованным* или *недогруженным* в силу *отсутствия механизмов количественной оценки эффективности* использования имеющихся в наличии ресурсов. *Научная гипотеза* настоящего исследования заключается в том, что данная проблема может быть решена за счет разработки и внедрения методов *оценки показателей эффективности* (определяемых через *критерии рационального использования* ресурсов подсистем АСУ), а также методов их повышения на основе *детального (факторного) анализа* существующей ситуации, выявления «узких мест» использования ресурсов и выработке рекомендаций по их обоснованному перераспределению. Реализация предлагаемых подходов АСУ позволяет выявить скрытые резервы и потенциал для их использования в целях повышения технико-экономических результатов функционирования предприятий и организаций. Недостаточная адаптивность, масштабируемость и практико-ориентированность известных методов оценки эффективности АСУ требует создания новых подходов и разработки инструментов их внедрения, что делает тему исследования актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам в области теории и практики использования автоматизированных систем управления на промышленных предприятиях посвящены работы зарубежных и отечественных уче-

ных: И.А. Баева, Н.К. Борисюка, Е.Д. Вайсман, Richard L. Daft, В.Д. Могилевского, А.М. Новикова, М.В. Подшиваловой, М. Porter, И.Г. Лукмановой, Р.С. Голова, В.В. Мыльника, В.Г. Смирнова, Е.Г. Чмышенко и др. При этом перспективными представляются дальнейшие исследования в области количественной и качественной оценки эффективности АСУ.

Разработке моделей оценки эффективности АСУ посвящены публикации А.А. Альбова, Н.С. Гнитиевой, Е.М. Глебовой, В.А. Долгова, В.П. Ковалевского, А.Д. Кошеева, М. Kremzar, А.А. Кутина, В.А. Милькина, А.В. Труслова, D. F. Wallac, Р.А. Файзрахманова, В.А. Харитоновна, О.О. Шендриковой и др. Их изучение выявило потребность в разработке и исследовании зависимостей показателей эффективности АСУ от характеристик их ресурсов и подсистем.

Среди иностранных и российских ученых, изучающих процессы оценки показателей эффективности использования ресурсов предприятий, можно назвать R.L. Askoff, Белоножкина В.И., Богомолу И.С., Бушуеву Л.И., Дегтяреву Т.Д., Камшилова С.Г., Кувшинова М.С., Никонорова С.П., Павлова В.А., Подшивалову М.А., М. Хаммера, Д. Хоббса, Д. Чампи, Спешилову Н.В., Столбова В.Ю., Трубилина А.И., Шестакову Е.В. и др. В развитие полученных ими результатов актуальна дальнейшая разработка в области повышения точности и объективности интегральных оценок показателей эффективности.

Методы повышения эффективности АСУ исследовались в трудах Дуброва А.М., Гайнанова Д.А., Сошниковой Л.А., Ореховой С.В., Столбовой И.Д., Сухарева О.С. и др. Несмотря на это, актуальными и перспективными задачами остаются разработка, исследование и внедрение методов повышения эффективности АСУ на основе моделей факторного анализа.

Проведенный аналитический обзор источников позволяет сделать вывод о том, что при значительном объеме научных работ в области совершенствования АСУ в цифровую эпоху часть вопросов остается не до конца решенными, что обуславливает актуальность выбранной тематики исследования.

Объектом исследования являются ресурсы автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами.

Предметом исследования являются модели оценки и методы повышения эффективности использования ресурсов видов обеспечения (подсистем) АСУ.

Цель диссертационного исследования заключается в повышении показателей эффективности АСУ на основе разработанных моделей и методов анализа факторов использования ресурсов.

Для реализации цели исследования определены и решены следующие задачи:

1. Аналитический обзор научных подходов, анализ специфики и недостатков существующих решений в области оценки эффективности АСУ и их подсистем, выбор направления для проведения исследований.
2. Разработка и исследование математических моделей зависимости показателей эффективности использования ресурсов подсистем АСУ от введенных факторов (наличие, доступность, востребованность).
3. Создание метода определения значимости ресурсов и их показателей важности в рамках интегральных критериев оценки эффективности АСУ.
4. Разработка метода повышения показателей эффективности АСУ на основе разработанных математических моделей и методов.

5. Апробация и внедрение предложенных моделей и методов с целью обоснования эффективности их применения.

Положения, выносимые на защиту и обладающие научной новизной:

1. *Математические модели* для расчета и анализа показателей эффективности использования ресурсов АСУ, оригинальность которых заключается в определении их зависимости от степени рационального использования (разницы между факторами наличия, доступности и востребованности), что позволило создать инструментарий для их оценки и прогнозирования (п. 12 «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУ, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени» паспорта специальности 2.3.3.).

2. *Метод определения значимости ресурсов и их показателей важности* в интегральных критериях оценки эффективности АСУ, который отличается от известных предложенным способом расчета показателей важности критериев на основе неравномерной шкалы оценивания, что позволило повысить характеристики объективности в оценке (п. 12 «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУ, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени» паспорта специальности 2.3.3.).

3. *Метод повышения эффективности АСУ*, отличающийся использованием предложенных в работе моделей анализа факторов и методе оценивания, что позволило выявить «узкие места» в использовании ресурсов и предложить механизм выработки управленческих воздействий (п. 14 «Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управления, повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации» паспорта специальности 2.3.3.).

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в расширении научных знаний в области оценки и анализа показателей эффективности АСУ, применения основных положений исследования для более эффективного распределения ресурсов, формирования методического и управленческого единства при системной организации АСУ, соответствующей современным условиям цифровизации производства.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в применении полученных результатов в структуре математического, информационного, программного и методического инструментария для апробации и использования. По основным показателям внедрения на промышленных предприятиях отмечено, что оно позволило:

– повысить показатели эффективного использования информационной инфраструктуры (средств вычислительной техники, программного обеспечения и телекоммуникационной сети) на 12 % (акт ООО «Канатэк»);

- улучшить технико-экономические показатели (среднее время решения проектных и управленческих задач) на 21 % (акт ООО «Стиком»).

Результаты работы использованы в содержании дисциплин «Методы принятия организационно-технических решений», «Методология и организация информационно-аналитической деятельности», «Основы управленческой деятельности» для направления подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность», реализуемого в ПНИПУ.

Материалы диссертации будут полезны при подготовке и переподготовке руководителей и специалистов АСУ предприятий и организаций.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследований составили работы отечественных и зарубежных авторов в области повышения эффективности функционирования АСУ. В ходе подготовки диссертации применялись методы системного анализа, теории автоматического управления, математического моделирования.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования обеспечена системным подходом к решению задачи повышения эффективности АСУ и использованием средств моделирования. Полученные результаты не противоречат представленным в публикациях отечественных и зарубежных исследователей.

Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийских и международных конференциях в городах Екатеринбург, Пермь, Оренбург и др., научно-методических семинарах ПНИПУ, тематика которых связана с вопросами организации и функционирования АСУ в условиях цифровизации, где получили положительную оценку.

Публикации. Результаты диссертационного исследования нашли отражение в 12 научных работах, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, 2 статьи в изданиях, индексированных в международной базе цитирования Scopus; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 119 страниц основного текста, 4 таблицы, 27 рисунков и 4 приложения. Список использованной литературы включает 199 наименований.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность темы диссертации, сформулированы объект и предмет исследования, цель работы, основные задачи, перечислены методы исследования, описана теоретическая и практическая значимость работы, раскрыта научная новизна и сведения о полученных результатах, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена рассмотрению анализу объекта исследования – АСУ предприятий и организаций реального сектора экономики. Выделены проблемы существующих АСУ, которые в недостаточной степени позволяют реализовать более эффективное использование имеющихся видов обеспечения.

Обобщенная структура АСУ включает в себя основные компоненты (виды обеспечения): методическое, техническое, организационное, программное, информационное, лингвистическое, правовое, эргономическое, имеющие ресурсы. Они описываются различными показателями эффективности – экономическими,

техническими, временными и пр., что затрудняет построение системы количественных оценок и требует разработки универсальных показателей.

Под *эффективностью* в работе предлагается понимать *степень использования ресурсов* подсистем АСУ. Этому можно дать вербальное описание: «Все, что нужно, приобретено, и оно работает», в этом случае показатель эффективности будет максимален. В случае, когда имеет место не востребованность («не все, что имеется, необходимо для решения текущих задач») или недогруженность («не все, что есть, работает»), показатели эффективности снижаются. Для их оценки необходимо выявить *факторы*, влияющие на эффективность использования ресурсов. Они должны быть измеримы, понятны, достаточно универсальны для использования в разных подсистемах (видах обеспечения) АСУ.

Для повышения показателей эффективности необходимо выполнить оценку текущих значений выбранных факторов, анализ «узких мест», выработку управляющих воздействий по их нивелированию. Эти функции могут выполнять соответствующие модули в обеспечивающей подсистеме АСУ (рисунок 1).

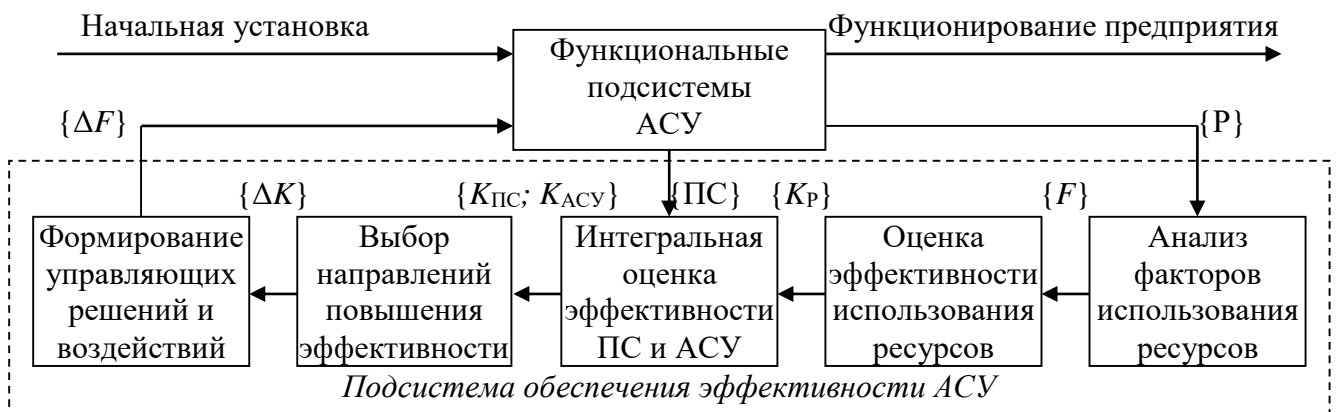


Рисунок 1 – Модули подсистемы обеспечения эффективности АСУ

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: P — ресурсы; ПС — подсистемы АСУ; {F} — совокупность факторов для оценки эффективности использования ресурсов подсистем АСУ; {K} — совокупность показателей (коэффициентов) эффективности; {ΔK} — совокупность выявленных недостаточных значений показателей эффективности; {ΔF} — управляющие воздействия на выбранные для улучшения факторы.

При этом важным является задание ограничений и условий, которые необходимо учитывать при улучшении выбранных показателей. Выбираются управляющие воздействия (установка или обновление программного обеспечения, повышение квалификации сотрудников, развитие сетевой инфраструктуры и т.п.). Оценивается, как это повысит показатели эффективности подсистем АСУ, соответственно, показатели эффективности функционирования предприятия (организации).

Прямой экономический эффект от повышения эффективности АСУ — результат каких-либо изменений в характере реализации функциональной составляющей управленческого процесса, как правило, непосредственно связанных со спецификой предметной области деятельности объекта управления:

- оптимизация затрат на закупку и обслуживание новой техники и ПО;
- перераспределение ресурсов для решения существующих и новых задач;

- уменьшение времени принятия управленческих решений;
- сокращение времени выполнения операций;
- повышение уровня автоматизации и пр.

Математическая постановка задачи

Введем коэффициент (показатель) эффективности использования одного ресурса одного вида обеспечения (далее – подсистемы) в виде дискретной величины $K(t_k)$, определяемый рядом факторов $f(t_k)$:

$$K(t_k) = \varphi(f_1(t_k), f_2(t_k), \dots, f_i(t_k), \dots, f_L(t_k)), \quad (1)$$

где L – количество выбранных факторов; t_k – момент времени, в который выбирается значение фактора и рассчитывается коэффициент эффективности; n – количество временных отсчетов. Далее для упрощения изложения будем подразумевать дискретный характер рассматриваемых величин и значение момента времени из формата записи опустим.

Ограничения.

1. K – величина безразмерная.
2. Область определения функции: $K \in [0; 1]$.
3. Область допустимых значений аргументов: $f_i \in [f_{i \min}; f_{i \max}]$.
4. Единицы измерения факторов – абсолютные, соответствуют оцениваемому ресурсу (штуки, часы и пр.). Они определяются на основании деятельности предприятия (это дано).

Далее введем показатели эффективности для подсистем АСУ.

АСУ состоит из *обеспечивающих подсистем (видов обеспечения)*:

$$АСУ = \{ПС_1, ПС_2, \dots, ПС_i, \dots, ПС_N\}, \quad (2)$$

где N – количество подсистем (ПС).

Каждая подсистема содержит *ресурсы (характеристики)*:

$$ПС_i = \{РП_1; РП_2; \dots; РП_{ij}; \dots РП_{iN_i}\}, \quad (3)$$

где N_i – количество ресурсов подсистемы (РП) в i -ой подсистеме.

Эффективность использования одного ресурса подсистемы в момент времени t_k – $K_{ij}(t_k)$, предлагается определять через расчет *коэффициента эффективности* по формуле (1).

Коэффициент эффективности одного ресурса подсистемы K_{ij} за рассматриваемый период (например, этап жизненного цикла) предлагается определять с использованием интегрального критерия:

$$K_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T K_{ij}(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n K_{ij}(t_k), \quad (4)$$

где $T = n\Delta t$ – длительность временного интервала оценивания; $\Delta t = (t_k - t_{k-1})$ – шаг дискретизации; K_{ij} определяются по формуле (1).

Эффективность использования всех ресурсов подсистемы K_i (дискретно (5.1) или за период (5.2)) предлагается определять с учетом коэффициентов эффективности ресурсов подсистемы:

$$K_i(t_k) = \psi(K_{i1}(t_k); K_{i2}(t_k); \dots; K_{ij}(t_k); \dots; K_{iN_i}(t_k)); \quad (5.1)$$

$$K_i = \frac{1}{T} \int_0^T K_i(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n K_i(t_k). \quad (5.2)$$

Эффективность использования всех ресурсов всех подсистем АСУ K предлагается определять с учетом коэффициентов эффективности подсистем:

$$K(t_k) = \theta(K_1(t_k); K_2(t_k); \dots; K_i(t_k); \dots; K_N(t_k)); \quad (6.1)$$

$$K = \frac{1}{T} \int_0^T K(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n K(t_k). \quad (6.2)$$

Сформулируем математическую постановку основных задач.

1. Выбрать значимые факторы для оценки эффективности.
2. Определить вид функционалов φ , ψ , θ .
3. Разработать способ ранжирования оценок степени важности критериев (ресурсов в подсистеме, подсистем в АСУ).
4. Выбрать и обосновать формат шкалы оценивания.
5. Разработать метод расчета и повести оценку интегральных показателей эффективности.
6. Предложить способ выявления «узких мест» и направления для повышения показателей эффективности за счет улучшения выбранных факторов.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию математических моделей для количественной оценки показателей эффективности АСУ.

Для оценки показателя эффективности конкретного ресурса АСУ вводятся следующие факторы – *наличие* (Н), *доступность* (Д), *востребованность* (В), которые для него оцениваются в каждый выбранный момент времени.

Определение 1. Будем понимать под фактором «наличие» имеющиеся ресурсы, измеряемые в абсолютных единицах.

Определение 2. Будем понимать под фактором «доступность» ресурсы, задействованные для выполнения текущих производственных задач.

Определение 3. Будем понимать под фактором «востребованность» ресурсы, необходимые для выполнения текущих производственных задач.

Введем систему ограничений.

1. $N > 0$ (всегда ресурсы есть в наличии).
2. $D \leq N$ (использована может быть часть ресурса или весь).
3. $B < N$: избыток (запас); $N < B$: недостаток.

Необходимо определить вид функционала φ из формулы (1) для количественной оценки показателей эффективности использования ресурсов через выбранные факторы. Далее предлагаются обоснование и расчетные соотношения *раздельного анализа факторов* для оценки показателя эффективности использования ресурса (по доступности и востребованности отдельно) и *совместного анализа факторов* (по обоим факторам) относительно фактора наличия. При этом используются введенные выше ограничения и условия нормирования показателя в диапазоне $[0; 1]$.

Введем *показатель эффективности использования ресурсов по доступности* K_d . Согласно предлагаемому в работе определению *эффективности как степени использования ресурсов* будем считать, что он находится в *обратной зависимости* от разности (Δ) между факторами наличия и доступности. Определим граничные условия:

1. $K_{\min} = 0$ – минимальное значение, Δ равна максимальному значению (Н), это возможно при $D = 0$ («все, что есть, не работает»);

2. $K_{\max} = 1$ – максимальное значение, Δ равна нулю: $H = D$ («все, что есть, работает»).

Влияние разности на коэффициент может быть разным (линейным или нелинейным), в зависимости от сформулированной мотивации (в рамках конкретной задачи; логики, принятой на конкретном предприятии и т.п.). Например, логика может быть такой – чем больше разница между факторами D и H , тем больше скорость роста функции коэффициента (вариант А – «плавный рост»), или наоборот (вариант Б – «насыщение»):

$$\text{вариант А: } K_d = \varphi(H, D) = \frac{e^{c\frac{D}{H}} - 1}{e^c - 1}; \text{ вариант Б: } K_d = \varphi(H, D) = \frac{1 - e^{-c\frac{D}{H}}}{1 - e^{-c}}, \quad (7)$$

где C – коэффициент, регулирующий скорость роста функции (задается экспертом). Отметим, что если для рассматриваемых в рамках конкретной производственной задачи условий нет необходимости во введении существенной нелинейности в зависимости, то можно использовать коэффициент $C = 1$. В этом случае без потери точности и ущерба для логики рассуждений предлагается считать, что характер функции φ *линейный*.

Исходя из высказанных соображений, введем следующий формат показателя эффективности использования ресурсов по доступности:

$$K_d = \varphi(H, D) = \frac{D}{H}. \quad (8)$$

Утверждение 1. Чем больше разность (Δ) между значениями факторов H и D , тем меньше показатель эффективности использования ресурса по доступности. Доказательство приведено в диссертации.

Введем *показатель эффективности использования ресурсов по востребованности* K_v . Согласно предлагаемому в работе определению *эффективности как степени использования ресурсов* будем считать, что он находится в *обратной зависимости* от разности (Δ) между факторами наличия и востребованности. Определим граничные условия:

1. $K_{\min} = 0$ – минимальное значение, Δ равна максимальному значению (Н), это возможно при $V = 0$ («все, что есть, не востребовано»);

2. $K_{\max} = 1$ – максимальное значение, Δ равна нулю: $H = V$ («все, что есть, востребовано»).

Исходя из высказанных соображений, введем следующий формат показателя эффективности использования ресурсов по востребованности:

$$K_v = \varphi(H, V) = \frac{\min(H, V)}{\max(H, V)}. \quad (9)$$

Предлагаемый формат отражает тот факт, что, согласно введенным выше ограничениям, востребованность может быть, как больше (недостаток), так и меньше (избыток) наличия.

Утверждение 2. Чем больше абсолютное значение разности ($|\Delta|$) между значениями факторов H и V , тем меньше показатель эффективности использования ресурса по востребованности. Доказательство приведено в диссертации.

Введем *показатель эффективности использования ресурсов по доступности и востребованности* K . Согласно предлагаемому в работе определению *эффективности как степени использования ресурсов* будем считать, что он находится в *обратной зависимости* от разности (Δ) между факторами наличия, доступности и востребованности. Определим граничные условия:

$K_{\min} = 0$ – минимальное значение, все Δ равны максимальному значению (H), это возможно при $D = B = 0$ («все, что есть, не востребовано и не работает»);

$K_{\max} = 1$ – максимальное значение, все Δ равны нулю: $H = D = B$ («все, что есть, востребовано и работает»).

Исходя из высказанных соображений, введем формат показателя эффективности использования ресурсов по доступности и востребованности:

$$K = \varphi(H, D, B) = \frac{D + \min(H, B)}{2 \max(H, B)}. \quad (10)$$

Утверждение 3. Чем больше абсолютные значения разностей ($|\Delta|$) между значениями факторов (H и D , H и B), тем меньше обобщенный показатель эффективности использования ресурса. Доказательство приведено в диссертации.

Рассмотрим два варианта соотношения факторов.

1. $H > B$ (запас, избыток). Формируется запас или избыток компонентов ресурса, следовательно, повышение эффективности может происходить либо по пути их задействования в текущих процессах производства ($\uparrow B$), либо по пути перераспределения имеющихся избытков ($\downarrow H$): Показатель эффективности определяется так:

$$\uparrow B: K = \lim_{\substack{D \rightarrow H \\ B \rightarrow H}} \frac{D+B}{2H}; \quad \downarrow H: K = \lim_{\substack{D \rightarrow H \\ H \rightarrow B}} \frac{D+B}{2H}. \quad (11)$$

2. $H < B$ (недостаток). Диагностируется недостаток компонентов ресурса, что определяет направление повышения эффективности либо путем внесения в планы предприятия соответствующих закупок ($\uparrow H$), либо снижением требований, например, к перечню решаемых ими задач ($\downarrow B$). В этом случае показатель эффективности определяется так:

$$\uparrow H: K = \lim_{\substack{D \rightarrow H \\ H \rightarrow B}} \frac{D+H}{2B}; \quad \downarrow B: K = \lim_{\substack{D \rightarrow H \\ B \rightarrow H}} \frac{D+H}{2B}. \quad (12)$$

Для повышения эффективности использования ресурсов, подсистем и всей АСУ примем две постановки задачи:

1. Задать изменение одного или нескольких факторов (в абсолютных единицах или в процентах) и рассчитать (спрогнозировать) изменение коэффициента эффективности (абсолютное или в процентах).

2. Задать желаемое изменение коэффициента эффективности (в абсолютных величинах или в процентах) и определить (промоделировать), изменение какого фактора (одного или нескольких) и насколько может привести к указанному эффекту (с учетом введенных ограничений).

Для решения задачи в указанных постановках необходимо определить *степень влияния факторов на коэффициент эффективности* через запись его полного дифференциала (для дискретных величин – через конечные разности):

$$\Delta K_D = \frac{\partial K_D}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial K_D}{\partial D} \Delta D; \Delta K_B = \frac{\partial K_B}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial K_B}{\partial B} \Delta B; \Delta K = \frac{\partial K}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial K}{\partial D} \Delta D + \frac{\partial K}{\partial B} \Delta B, (13)$$

где Δ – разница между текущим и новым значением; $\frac{\partial K}{\partial f}$ – частная производная по выбранному фактору (H, D, B), которая определяет влияние данного фактора на интегральный показатель:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial K_D}{\partial H} = -\frac{D}{H^2}; \frac{\partial K_D}{\partial D} = \frac{1}{H}; \\ B < H: & \frac{\partial K_B}{\partial H} = -\frac{B}{H^2}; \frac{\partial K_B}{\partial B} = \frac{1}{H}; \frac{\partial K}{\partial H} = -\frac{(D+B)}{2H^2}; \frac{\partial K}{\partial D} = \frac{1}{2H}; \frac{\partial K}{\partial B} = \frac{1}{2H}; \\ B > H: & \frac{\partial K_B}{\partial H} = \frac{1}{B}; \frac{\partial K_B}{\partial B} = -\frac{H}{B^2}; \frac{\partial K}{\partial H} = \frac{1}{2B}; \frac{\partial K}{\partial D} = \frac{1}{2B}; \frac{\partial K}{\partial B} = -\frac{(D+H)}{2B^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Предложены две постановки задачи для динамического анализа коэффициента эффективности использования ресурсов:

- достижение максимальной эффективности на заданном интервале времени;
- заданная эффективность достигается за минимальное время.

Для последующего расчета показателей эффективности использования ресурса, а также интегральных показателей, по результатам деятельности предприятия заполняется таблица для всей АСУ, подсистемы или конкретного ресурса, эффективность использования которого необходимо улучшить (формат таблицы приведен в диссертации).

Для оценки эффективности строится график зависимостей H, D, B и K от времени (рисунок 2).

По графику $K(t) = \varphi(H, D, B, t)$ можно определить:

- общую длительность спада, роста, стагнации (в процентах от общего времени, с заданными отклонениями δ^+ и δ^-);
- общую длительность времени, где коэффициент больше заданного порога (например, 75 %);
- максимальную скорость роста и спада ($\Delta K / \Delta t$).

Для оценки эффективности строится график зависимости $K(H, D, B)$ от времени (рисунок 2).

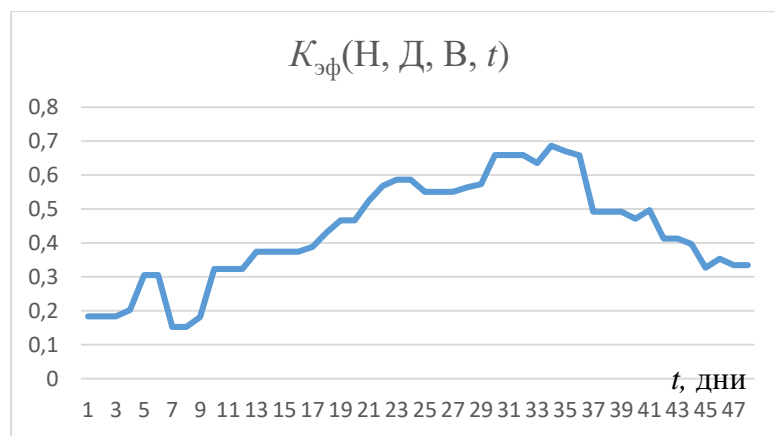


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эффективности $K(H, D, B)$ от времени

На основании проведенного анализа предлагается использовать S-образный характер изменения показателей эффективности (рисунок 3).

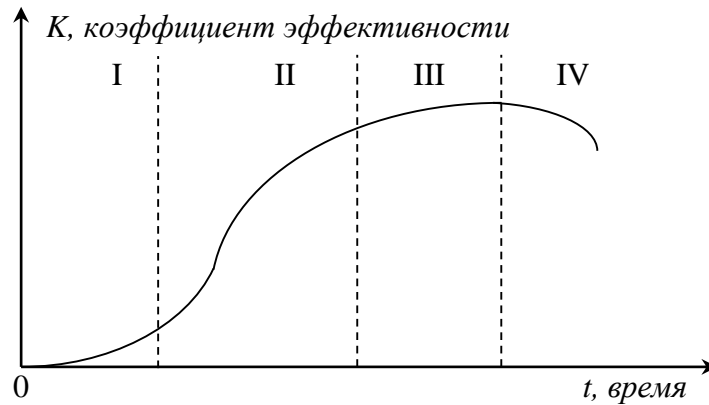


Рисунок 3 – График изменения эффективности использования ресурсов

Выделяется четыре периода в процессе жизненного цикла ресурса:

I – закупка, установка, настройка (медленный рост эффективности);

II – штатное функционирование (резкое увеличение эффективности за счет расширения внедрения и увеличения перечня решаемых задач);

III – стагнация показателей (эффективность не повышается, решаются старые задачи, новые не ставятся);

IV – спад показателей (эффективность снижается за счет уменьшения доли задач, решаемых с помощью данного ресурса).

С учетом S-образного (сигмоидального) характера изменения показателей эффективности предлагается использовать экспоненциальный характер *желаемых* (описывающих этапы) характеристик.

На график $K = \varphi(t)$ наносится желаемый вид характеристики. Например, для этапа I (наладка) и этапа II (штатная эксплуатация) она представляется в следующем виде:

$$\text{Для этапа I: } K^{\text{ж}}(t) = \frac{K_{\text{max}} e^{cT}}{e^c - 1}; \text{ для этапа II: } K^{\text{ж}}(t) = \frac{K_{\text{max}}(1 - e^{-cT})}{1 - e^{-c}}, \quad (15)$$

где K_{max} – максимальное значение показателя эффективности в момент времени завершения этапа; T – время окончания периода; C – коэффициент, определяющий характер роста (спада) функции. График задается относительно точки начала этапа.

Желаемые характеристики наносятся на график вместе с детализированными значениями показателей Н, Д, В и коэффициентов их эффективного использования с целью определить тренды их изменения для возможной коррекции или прогнозирования.

В третьей главе представлен разработанный метод оценивания интегральных показателей эффективности АСУ. Показатели эффективности использования ресурсов подсистем оцениваются способом, предложенным в главе 2. Для интегральных показателей выбирается средневзвешенный критерий оценивания из-за его хорошо исследованных свойств, удобства реализации, достаточной точности для решаемых задач.

Эффективность использования всех ресурсов подсистемы K_i (дискретно или за весь период) предлагается определять через расчет *коэффициента эффективности* с учетом коэффициентов эффективности ресурсов подсистемы:

$$K_i = \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ij} K_{ij}, \quad (16)$$

где λ_{ij} – весовой коэффициент (показатель важности ресурса).

Эффективность использования ресурсов подсистем АСУ K предлагается определять через расчет *коэффициента эффективности* с учетом коэффициентов эффективности подсистем:

$$K = \sum_{i=1}^N \lambda_i K_i, \quad (17)$$

где λ_i – весовой коэффициент (показатель важности подсистемы).

Коэффициенты могут быть определены в каждый дискретный момент времени t_k , а также за весь интересующий интервал времени T .

Для повышения объективности оценивания предлагается авторский метод определения показателей важности критериев (весовых коэффициентов). Он реализуется в следующей последовательности.

1. Проводится *определение оценок значимости* ресурсов в каждой подсистеме, каждой подсистемы в АСУ, на основе экспертной оценки, заполняется таблица (приведена в диссертации), с учетом согласованности их мнений.

Предложено использовать комплексную трехэтапную методику количественной оценки, в качестве первого этапа которой используется экспертный опрос (методика СВ-90), в качестве второго – для определения сокращения трудозатрат (методика «JS Penney»), в качестве третьего – расчет расходов на внедрение и использование автоматизированных информационных систем («оценка портфелей»).

2. Проводится *ранжирование* векторов оценок с использованием неравномерной шкалы. Разработан *способ ранжирования*, отличительной особенностью которого является неравномерность распределения интервалов между соседними оценками (например, для четырехуровневой шкалы оценивания (5, 4, 3, 2): $\Delta_{54} < \Delta_{43} < \Delta_{32}$, соответственно $\Delta_{53} = \Delta_{54} + \Delta_{43}$ и т.д., для обратных величин: $\Delta_{45} = -\Delta_{54}$ и т.д.). Причем численные значения интервалов непринципиальны, главное – выдержать отношение неравенства (например, можно задать их $\Delta_{54} = 1$, $\Delta_{43} = 2$, $\Delta_{32} = 3$).

Способ ранжирования векторных оценок с переменным шагом между уровнями шкалы:

$$\Delta_{i,i+1} < \Delta_{i+1,i+2}, i \in [1; L-1]. \quad (19)$$

Разность между произвольными уровнями:

$$\Delta_{i,j} = \sum_{k=i}^j \Delta_{k,k+1}, i \in [1; L-1], j \in [i+1; L], i < j. \quad (20)$$

Для ранжирования вычисляется разность между всеми парами векторов оценок, а полученный список сортируется в порядке убывания абсолютного значения разности между векторными оценками:

$$d_{i.s,i.r} = \sum_{k=1}^m (o_{i.s}^k - o_{j.r}^k) = \sum_{k=1}^m d_{i.s,i.r}^k; \quad (21)$$

$$\text{sign}(d_{i.s,i.r}) = \begin{cases} > 0, \text{ оценки ресурса } i.s \text{ "лучше" оценок } i.r \\ = 0, \text{ оценки ресурса } i.s \text{ "равны" оценкам } i.r \\ < 0, \text{ оценки ресурса } i.s \text{ "хуже" оценок } i.r \end{cases} \quad (22)$$

где $d_{i.s,i.r}$ – разница между строками оценок ресурсов $i.s$ и $i.r$ в i -ой подсистеме; $O_{i.s}^k$ – оценка k -го эксперта ресурса $i.s$; $O_{i.r}^k$ – оценка k -го эксперта ресурса $i.r$; $d_{i.s,i.r}^k$ – разница между оценками k -го эксперта для сравниваемых ресурсов; m – количество экспертов; sign – операция определения знака.

Пример 1.

$O_{1.1}$	5 4 5 4 3		$O_{1.2}$	4 5 5 5 5
$O_{1.2}$	4 5 5 5 5	=>	$O_{1.3}$	5 4 4 4 4
$O_{1.3}$	5 4 4 4 4		$O_{1.1}$	5 4 5 4 3

Пояснения к расчету.

$$\begin{aligned} d_{1.1,1.2} &= O_{1.1} - O_{1.2} = (5 - 4) + (4 - 5) + (5 - 5) + (4 - 5) + (3 - 5) = \\ &= \Delta_{54} + \Delta_{45} + \Delta_{55} + \Delta_{45} - \Delta_{35} = 1 + (-1) + 0 + (-1) + (-3) = -4; \\ d_{1.1,1.3} &= -1; d_{1.2,1.3} = 3. \end{aligned}$$

3. Определяются *весовые коэффициенты* для интегральных критериев с учетом различий между векторами оценок. Разработан *способ определения показателей важности критериев* (весовых коэффициентов). Вводится формальная переменная x . Значение минимальной оценки w в списке после ранжирования устанавливается равным значению переменной x :

$$w_{Ni} = x, \quad (23)$$

где N_i – количество векторов оценок в списке (оцениваемой подсистеме АСУ).

Следующим по списку присваиваются значения по следующему правилу:

$$w_{i,l} = w_{i,l-1} + |d_{i,l,i,l-1}| \cdot x, \quad (24)$$

где i – номер подсистемы АСУ, l – номер текущего вектора оценок в ранжированном списке; $(i-1)$ – номер предыдущего вектора оценок в ранжированном списке; $i \in [1; N_i]$; $d_{i,l,i,l-1}$ – разность между соседними векторами оценок. Для рассматриваемого примера:

$$\text{РП}_{1.1} : x; \text{РП}_{1.3} : 2x, \text{РП}_{1.2} : 5x.$$

Далее составляется уравнение для определения формальной переменной x и последующего расчета весовых коэффициентов (с учетом условия нормирования – сумма всех коэффициентов равна 1):

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^{N_i} \lambda_{i,l} = \sum_{l=1}^{N_i} w_{i,l} = 1; \\ x + 2x + 5x = 1; x = 1/8; \lambda_{1.1} = 1/8; \lambda_{1.3} = 2/8; \lambda_{1.2} = 5/8. \end{aligned} \quad (25)$$

Полученные весовые коэффициенты используются при расчетах показателей эффективности АСУ в соответствии с математической постановкой задачи.

Четвертая глава представляет метод повышения эффективности использования ресурсов АСУ. Он содержит два этапа.

Подготовительный этап

1. Определить подсистемы АСУ и их ресурсы.
2. Составить таблицу и подобрать экспертов для оценки значимости ресурсов подсистем АСУ.

3. Провести анкетирование, определить уровень согласованности мнений экспертов, заполнить таблицу.
4. Выполнить ранжирование параметров.
5. Рассчитать весовые коэффициенты для ресурсов и подсистем АСУ.

Операционный этап

1. Определить текущие и желаемые показатели эффективности деятельности предприятия.
2. Выявить несоответствия.
3. Выбрать направления для улучшения в рамках АСУ.
4. Оценить текущие значения факторов (Н, Д, В).
5. Определить, какие из них можно улучшить и на сколько.
6. Выполнить предварительный расчет с целью прогнозирования улучшения показателей эффективности ресурсов и подсистем АСУ.
7. Провести мероприятия по модернизации выбранных ресурсов и подсистем АСУ.
8. Оценить изменение показателей эффективности.
9. Сделать вывод о достаточности проведенных мероприятий или необходимости последующих шагов по дальнейшей модернизации.
10. Оценить ресурсы для дальнейшей модернизации.

В результате проведенного анализа появляется возможность дать оценку комплексного или интегрального показателя эффективности АСУ. Особенностями данного инструментария являются критериальные и подсистемные рамки для показателей эффективности использования ресурсов АСУ, ориентированные на изменение значимых факторов, воздействие цифровых условий, непосредственно относящихся к деятельности конкретного промышленного предприятия. Это позволяет использовать предлагаемый коэффициент как интегральный (т.е. набор показателей развития АСУ) самостоятельный инструмент.

В *первой постановке задачи* может быть задано желаемое изменение коэффициента эффективности (например, в процентах) какого-либо ресурса. На основании введенных в главе 2 формул можно определить набор решений для изменений разных факторов.

Пример 2. Дано: $H = 100$ ед., $D = 60$ ед., $B = 80$ ед., увеличить K на 10 %.

Найти: насколько нужно изменить фактор D .

Решение: $K = (60 + 80)/(2 \cdot 100) = 0,7$.

$$K = \frac{(60 + 80)}{2 \cdot 100} = 0,7; \quad \frac{\Delta K}{K} = 0,1 \Rightarrow \Delta K = 0,7 \cdot 0,1 = 0,07;$$

$$\Delta D = \frac{\Delta K}{\frac{\partial K}{\partial D}} = \frac{\Delta K}{\frac{1}{2H}} = \frac{0,07}{\frac{1}{2 \cdot 100}} = 14.$$

Вывод: нужно увеличить фактор D на 14 единиц.

Во *второй постановке задачи* можно оценить влияние изменения выбранных факторов (одного или нескольких) на изменение показателя эффективности.

Пример 3. Дано: $H = 100$ ед., $D = 60$ ед., $B = 80$ ед., увеличить D на 10 %.

Найти: насколько изменится K .

Решение: $K = (60 + 80)/(2 \cdot 100) = 0,7$.

$$K = \frac{(60 + 80)}{2 \cdot 100} = 0,7; \frac{\Delta D}{D} = 0,1 \Rightarrow \Delta D = 60 \cdot 0,1 = 6;$$

$$\Delta K = \frac{\partial K}{\partial D} \Delta D = \frac{1}{2H} \Delta D = \frac{1}{2 \cdot 100} \cdot 6 = 0,03.$$

Вывод: коэффициент эффективности увеличится на 3 %.

Алгоритм применения предлагаемого методического подхода к совершенствованию системы эффективного использования АСУ представлен в работе. Выбор варианта может быть выполнен на базе различных методов оптимизации по критериям: стоимость (человеко-часов), стоимости продукции (руб.), затраченного времени и т.д.

При выработке управляющих решений нужно учитывать разные *ситуации соотношения факторов*.

Ситуация 1: $V < D < H$. В этом случае задействованы «лишние» ($D - V$) компонентов оцениваемого ресурса. Варианты повышения эффективности:

- $V \rightarrow D$: повысить востребованность за счет ввода новых задач;
- $D \rightarrow V$: вывести из эксплуатации «лишние» компоненты;
- $H \rightarrow D$: перераспределить компоненты (например, в другие подсистемы).

Ситуация 2: $D < V < H$. В этом случае не задействованы «нужные» ($V - D$) компонентов оцениваемого ресурса. Варианты повышения эффективности:

- $D \rightarrow V$: повысить доступность за счет задействования нужных компонентов;
- $V \rightarrow D$: исключить «лишние» задачи;
- $V \rightarrow H$: ввести новые задачи.

Ситуация 3: $D < H < V$. Варианты повышения эффективности:

- $V \rightarrow H$: исключить часть задач;
- $H \rightarrow V$: приобрести «недостающие» компоненты;
- $D \rightarrow H$: задействовать все компоненты.

Применение предложенного метода позволяет оценить текущие значения факторов и показателей эффективности, выбрать направления для коррекции, сформировать список рекомендаций для управляющих воздействий.

Пятая глава содержит данные апробации и внедрения разработанных моделей и методов на промышленных предприятиях. Внедрение результатов диссертационного исследования проведено для ООО «Канатэк» (АСУ SAP R3) и ООО «Стиком» (АСУ 1С: ERP).

Этапы жизненного цикла АСУ: 1 этап: 1-2 месяца; 2 этап: 3-5 месяца; 3 этап: 6-9 месяцев; 4 этап: 4-6 месяцев.

Для оценки АСУ были рассмотрены характеристики, представленные ранее. Были собраны значения показателей за период с 01.01.2021 по 31.12.2022 по данным экономических отделов предприятий.

Построены графики НДВ и коэффициент эффективности АСУ по всем характеристикам, например, сравнение коэффициентов: «до» и «после» корректировки (рисунок 4).

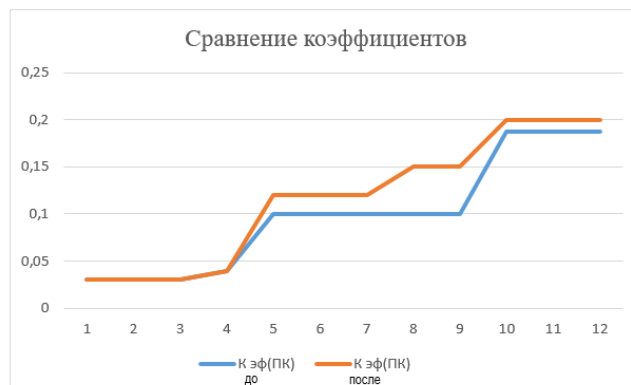


Рисунок 4 – Сравнение коэффициентов (ПК на одного сотрудника, первый период): «до» и «после» корректировки для ООО «Канатэк»

Ожидаемый экономический эффект от внедрения аналитического инструментария и реализации приоритетных направлений организации эффективной АСУ на ООО «Канатэк» составит за период 2021-2024 гг. примерно 50 млн. руб., что составляет 4,2 % от общей выручки. Ожидаемая эффективность для ООО «Стиком» – 10-12 млн. руб., что составляет 8,9 % от общей выручки.

Проведенные процедуры позволили выявить «узкие места», устранение которых с приводит к значимому экономическому эффекту с позиции определения приоритетных направлений организации, как эффективной АСУ, так и хозяйственной деятельности предприятия в целом.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности автоматизированных систем управления на основе анализа факторов использования ресурсов с помощью разработанных моделей, методов и практических рекомендаций на их основе.

В рамках проведенного исследования получены основные результаты:

1. В процессе анализа научных подходов выявлены специфика и недостатки существующих решений в области оценки эффективности использования ресурсов АСУ, выбраны направления для проведения исследований.

2. Разработаны и исследованы математические модели зависимости показателей эффективности использования ресурсов подсистем АСУ от введенных факторов (наличие, доступность, востребованность). Рассмотрены несколько постановок задач. Предложен S-образный (сигмоидальный) характер изменения показателей эффективности.

3. Предложен метод оценивания интегральных показателей эффективности для АСУ. Разработанный способ ранжирования отличается особенностью наличия неравномерности распределения интервалов между соседними оценками. Полученные соотношения для определения весовых коэффициентов в зависимости от значимости соответствующего критерия.

4. Создан метод повышения показателей эффективности АСУ на основе разработанных математических моделей и метода оценивания. Применение предложенного метода позволяет оценить текущие значения факторов и показателей

эффективности, выбрать направления для коррекции, сформировать перечень практических рекомендаций для управляющих воздействий.

5. Апробированы и внедрены разработанные модели и методы на предприятиях и организациях реального сектора экономики. Проведенные процедуры позволили выявить «узкие места», устранение которых с приводит к значимому экономическому эффекту с позиции определения приоритетных направлений организации, как эффективной АСУ, так и хозяйственной деятельности предприятия в целом.

Результаты работы, связанные с оценкой эффективности АСУ могут быть востребованы для улучшения хозяйственной деятельности предприятий и организаций различного профиля с использованием предложенного математического, программного и методического инструментария.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Бочкарев, А.М. Совершенствование системы управления информационным обеспечением промышленного предприятия / А.М. Бочкарев, В.И. Фрейман // Прикладная математика и вопросы управления (Applied Mathematics and Control Sciences). – 2022. – № 1. – С. 125-150.

2. Бочкарев, А.М. Оценка соответствия критериев эффективности и ключевых параметров подсистем управления информационным обеспечением промышленного предприятия / А.М. Бочкарев, В.И. Фрейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 41. – С. 71-89.

3. Бочкарев, А.М. Математические модели для расчета и анализа показателей эффективности использования ресурсов автоматизированных систем управления / А.М. Бочкарев // Моделирование, оптимизация, информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 2. – С. 1-11.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования

4. Bochkarev, A. Methodological aspects of information support in the enterprise management system / A. Bochkarev, A. Urasova, D. Balandin // ACM International Conference Proceeding Series. – 2021. – 3490853.

5. Plotnikov, A. Data on post bank customer reviews from web / A. Plotnikov, A. Shcheludyakov, V. Cherdantsev, A. Bochkarev, I. Zagoruiko // Data in Brief. – 2020. – 32. – 106152.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018619216 РФ. Ранжирование векторных величин с использованием неравномерной шкалы оценивания: № 2023661905, опубл. 05.06.2023 / В.И. Фрейман, А.М. Бочкарев; заявитель ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023661905 РФ. Объективный расчет показателей важности критериев для определения интегральной оценки: опубл. 05.06.2023 / А.М. Бочкарев, В.И. Фрейман; заявитель ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

Прочие публикации

8. Bochkarev, A. The Models of Corporate Governance / A. Bochkarev, V. Serogodsky, V. Cherdantsev, I. Zagorujko // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) Volume-8 Issue-4, November. – 2019. – P. 8890-8895.

9. Бочкарев, А.М. Модель управления системой информационного обеспечения производственной деятельности промышленного предприятия / А.М. Бочкарев // Вестник Удмуртского государственного университета. – 2015. – Т. 25. – № 4. – С. 35-42.

10. Бочкарев, А.М. Анализ системы информационного обеспечения производственного предприятия / А.М. Бочкарев // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2017. – № 9-4 (56). – С. 13-18.

11. Бочкарев, А.М. Особенности структурного подхода к системе информационного обеспечения производственной деятельности предприятия / А.М. Бочкарев // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. – 2017. – № 11 (58). – С. 570-574.

12. Бочкарев А.М. Оценка влияния факторов НДДВ анализа на эффективность системы управления информационным обеспечением промышленного предприятия // «Форпост науки». – 2022. – № 4 (62). – С. 35-39.