

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Специальность: 3341.01 – Электрические станции
(электрическая часть) и электроэнергетические системы

Отрасль науки: Техника

Соискатель: **Фарзалиев Юсиф Зейни оглы**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук по технике

Баку – 2024

Диссертационная работа выполнена в Азербайджанском Научно-Исследовательском и Проектно-Изыскательском Институте Энергетики

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Фархадзаде Эльмар Мехтиевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Лазимов Тахир Мидхет оглы
доктор технических наук, профессор
Гусейнов Агил Гамид оглы
доктор технических наук, профессор
Обоскалов Владислав Петрович
доктор технических наук, профессор
Саидов Расим Азим оглы

Диссертационный совет ED 2.04 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующий на базе Азербайджанского Технического Университета

Председатель Диссертационного Совета: Заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор

Юсифбейли Нурали Адиль оглы

Ученый секретарь диссертационного совета: кандидат технических наук, доцент

Фархадов Вахид Гара оглы

Председатель научного семинара: доктор технических наук, доцент

Гулиев Гусейнгулу Байрам оглы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности работы.

Совершенствование управления эксплуатационной надежностью оборудования и устройств (объектов) электроэнергетических систем (ЭЭС) относится к числу наиболее актуальных и трудных проблем энергетики. Традиционно это управление проводится на качественном уровне и основывается на нормативных документах, на опыте работы, интуиции и квалификации персонала.

С течением времени возрастает доля объектов, срок службы которых превышает расчетный. В настоящее время для большей части объектов она превышает 50%. Техническое состояние этих объектов ухудшается, а затраты на восстановление износа возрастают. Увеличению эксплуатационных затрат содействует также уменьшение периодичности аварийных и плановых ремонтов, рост продолжительности простоя. Замена объектов, ресурс которых исчерпан, на новые, имеющие отличное конструктивное исполнение, принцип работы, управление, диагностику технического состояния, снижает значимость накопленного опыта работы. Эти замены требуют систематической переподготовки персонала, повышения квалификации.

Таким образом, совершенствование существующей системы управления эксплуатационной надежностью актуально.

Одним из наиболее значимых направлений в этом является периодическая и своевременная методическая поддержка персонала. К наиболее востребованным рекомендациям относятся:

- ранжирование объектов по надежности и экономичности (эффективности) работы;
- указания на «слабые звенья» объектов, основные причины, вызывающие ухудшение технического состояния;

- оценку качества:
 - управления режимами работы объектов;
 - восстановления износа в период планового ремонта;
 - консервации в период вынужденного простоя и ряд других.

Решение этих задач связано, прежде всего, с методическими трудностями, т.к. отсутствует не только соответствующая автоматизированная система, но и соответствующие методы, и алгоритмы расчета.

Статистические данные об износе, дефектах и отказах относятся к многомерным данным. Иначе говоря, показатели надежности объектов зависят от большого числа признаков и их разновидностей. На практике эта особенность учитывается частично. Проводится классификация статистических данных по одному, двум и даже иногда трем признакам (например, по типу выключателя, классу напряжения и месту установки) и вычисляются показатели надежности. При этом считается, что случайные величины (например, длительность простоя в аварийном ремонте) есть выборка из генеральной совокупности. Вторым недостатком традиционного подхода при количественной оценке показателей и характеристик надежности является пренебрежение к оценке целесообразности классификации данных. Очевидно, что если показатели и характеристики надежности, вычисленные по совокупности данных и выборке, различаются, случайно, то классификация совокупности данных нецелесообразна. Применение классических методов анализа случайных выборок из генеральной совокупности, например, метода доверительных интервалов, приводит в большинстве случаев к выводу о случайном характере расхождения усредненной оценки показателя надежности и оценки, вычисленный по некоторой неслучайной выборке. А неслучайна она потому, что данные выборки получены не случайно, а для некоторой разновидности признака.

Физические процессы, протекающие при эксплуатации между энергетическими устройствами и приборами энергосистемы, по своей природе очень трудоемкие и сложные. Если иметь ввиду сотни тысяч единиц агрегатов, которые каждый по себе характеризуется свойственным ему признаком, то и этот признак еще сам по себе делится на под признаки. Итак, в результате мы получаем многоликость свойств взаимоотношений элементов, присутствующих в процессе, которая называется многомерность проявления атрибутов. Но отсутствие методов анализа многомерных данных в этой области заставляет принимать анализ этого процесса, как процесс изучения генеральной совокупности. Соответственно, расчеты показателей и характеристик надежности оборудования и устройств проводятся методами в направлении на анализ выборок из генеральной совокупности. А это предположение приводит к ошибочным решениям. Считается, что генеральная совокупность распределена по нормальному закону распределения, но в действительности мы имеем дело с конечной совокупностью незнакомой нам функцией распределения при решении поставленных задач.

Статистические данные несколько ограничены, что при работе с функциями распределения этих данных применить к ним доверительные интервалы, как это делается при традиционных подходах, категорически неуместно. В свою очередь, это предположение приводит к ошибочным решениям со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В диссертационной работе для решения этих задач были применены основные положения теории проверки статистических гипотез, теории статистических вычислений и фидуциальные интервалы. Конечно, ранее в этой области были исследования других авторов. Т. Андерсон в 1963 году, изучая выборки и совокупности на основе нормального закона распределения, разработал математические модели, которые послужили основой многомерного статистического анализа, и дал табуляцию малых случайных чисел.

Впервые в Сибири создал фундаментальную школу Лев Александрович Мелентьев, у которого основная идея была комплексное изучение энергетики. В этой же школе академики В.А. Стенников, Ю.Н. Руденко развили научную ветвь надежности и живучести систем энергетики и их методические основы обоснования развития энергетики регионов. А.П. Меренков открыл направление методологии системных исследований. Н.И. Воропай и Л.Д. Криворучский создали систему мониторинга энергетической и экономической безопасности.

В 60-ые годы Рябинин И.А. разработал логико-математические основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Гнеденко Б. В. блестяще применил методы теории вероятностей и математической статистики и основал теорию математических подходов в области энергетики. Великий ученый А.Н. Колмогоров, впервые моделируя случайные числа (статистические данные), дал критические значения свойств для их статистических функций распределения.

М. Кендал & А. Стюарт в 1966 году во многом расширили применение теории распределения в статистике, предложив более ясную картину для фидуциального интервала в 1973 году.

Ю.Г. Поляк в 1971 году при вопросах алгоритмизации и программировании, всесторонне изучил вероятностные моделирования. Дж. Клейнен в 1978 году впервые дал точное определение имитационному моделированию, оно звучало так: исследование модели сложной системы, направленное на получение информации о самой системе. К. Шеннон в 1978 году проанализировал ошибки при имитационном моделировании и на их основе разработал новые математические модели. Дж. Р. Левин и А.А. Томпсон в 1993 году, в свою очередь, занимались операционными рисками при разработке этих моделей. Кроме этого, изучили проверки статистических гипотез в области доверительных интервалов и фидуциальных границ, основоположниками которых являются Джордж Нейман – 1915 год и Рональд Фишер – 1930 год. Ф. Диаконис в 1994 году для

улучшения быстрой алгоритмизации применил малую выборку, число элементов которых не превысило 20-и.

Элдридж в 2000 году сопоставил работы Р. Фишера с работой Гарольда Джеффрейса, которые исследовали теорию ошибок в области теории вероятности.

Последние годы профессор М.А. Дуэль и доцент Т.Н. Фурцева из Украины добились успеха при создании автоматизированных информационных систем для анализа фактического технического состояния функционирования энергетических оборудований и устройств энергетических систем.

Геннадий Ковалев и Людмила Лебедева выпустили книгу «"Reliability of Power Systems" ("Надежность систем электроэнергетики)». В книге поставлена цель формализации и алгоритмизации задачи оценки надежности современных, электроэнергетических систем при обосновании их развития.

Arendacka B, Casella, G. and Berger, R.L., Liang Yan, Lidong E, Jan Hannig, and Hari Iyer, Hartung, J. and Knapp, G., Gunnar Taraldsen and Bo Henry Lindqvist дали свои полезные научные труды для расширения применения фидуциальных методов.

A, Samuel A.O., Zhijian Zhang в направлении многомерности статистических данных разработали специальные методы и соответствующие системы и тем самым обогатили число работ в данной области.

Сегодня, когда актуальны задачи, связанные с эксплуатацией основного устаревшего оборудования и устройств энергосистемы, при ограниченности статистических данных о функционировании этих объектов, применение традиционных методов и подходов просто некорректно.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования являются оборудование и устройства ЭЭС. В иллюстративных целях в диссертации используется информация о надежности и экономичности силовых трансформаторов, выключателей, котельных установок энергоблоков 300 МВт ТЭС на газо-мазутном топливе.

Предметом исследования является эксплуатационная надежность объектов ЭЭС. Исследования проводятся на основе имитационного моделирования закономерности изменения случайных величин, применения основных положений теории проверки статистических гипотез, математического аппарата теории статистических вычислений, применения метода фидуциальных интервалов.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является автоматизированное управление эксплуатационной надежностью оборудования и устройств электроэнергетических систем. Достижение этой цели требует ответа на вопросы о точности и достоверности количественных оценок показателей и характеристик надежности, о методах их сравнения, классификации и ранжирования, что и позволит снизить риск ошибочного решения эксплуатационных задач.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка методов и алгоритмов оценки целесообразности классификации статистических данных при оценке показателей и характеристик надежности объектов ЭЭС. Решение этой задачи преследует одну цель – переход от усредненных оценок к индивидуальным оценкам. Следует отметить многогранность этой задачи. Методы и алгоритмы классификации данных зависят, прежде всего, от способа оценки показателей и характеристик надежности и от решаемой эксплуатационной задачи;
2. Совершенствование методов и алгоритмов расчета критических значений параметров, характеризующих статистические свойства многомерных случайных величин. Дело в том, что целесообразность классификации оценивается критерием, который необходимо выбрать или разработать. При разработке критериев необходимо учесть малочисленность данных и характер их статистического распределения;

3. Разработать методы и алгоритмы расчета показателей и характеристик надежности кластеров объектов ЭЭС. Такая классификация объектов оказывает существенную методическую поддержку при организации их технического обслуживания и ремонта;
4. Повысить эффективность методов и алгоритмов анализа технического состояния оборудования ЭЭС по их технико-экономическим показателям на примере котельной установки энергоблоков 300 МВт ТЭС. Методы и алгоритмы должны обеспечить возможность ранжирования котельных установок, формирования основных направлений повышения надежности и экономичности работы, оценки качества управления режимами работы, сохраняемости технического состояния при вынужденных простоях и восстановлении износа;
5. Совершенствование методов и алгоритмов анализа технического состояния крупных объектов ЭЭС по их технико-экономическим показателям на примере энергоблоков 300 МВт ТЭС. Методы и алгоритмы должны обеспечить более полное использование резервов тепловой экономичности, возможность ранжирования энергоблоков и выявление их «слабых звеньев», распределение нагрузки между энергоблоками, срок службы которых превышает расчетный, а экспериментальные энергетические характеристики не соответствует действительным.

Методы исследования

Исследования проводятся на основе имитационного моделирования закономерности изменения случайных величин, применения основных положений теории проверки статистических гипотез, математического аппарата теории статистических вычислений, применения метода фидуциальных интервалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка методов и алгоритмов оценки целесообразности классификации статистических данных при оценке показателей и характеристик надежности объектов ЭЭС. Решение этой задачи

имеет одну цель-переход от средних оценок к индивидуальным. Следует отметить сложность этой задачи. Методы и алгоритмы классификации данных зависят, прежде всего, от метода оценки показателей и характеристик надежности и от решаемой оперативной задачи;

2. Совершенствование методов и алгоритмов расчета критических значений параметров, характеризующих статистические свойства многомерных случайных величин. Дело в том, что целесообразность классификации оценивается по критерию, который необходимо выбрать или разработать. При разработке критериев необходимо учитывать малое количество данных и характер их статистического распределения;

3. Разработать методы и алгоритмы расчета показателей и характеристик надежности кластеров объектов ЭЭС. Данная классификация объектов обеспечивает существенную методическую поддержку в организации их технического обслуживания и ремонта;

4. Повысить эффективность методов и алгоритмов анализа технического состояния оборудования электростанции по их технико-экономическим показателям на примере котельной установки энергоблоков ТЭС мощностью 300 МВт. Методы и алгоритмы должны обеспечивать возможность ранжирования котельных установок, формирования основных направлений повышения надежности и эффективности эксплуатации, оценки качества контроля режимов работы, поддержания технического состояния в период вынужденных простоев и восстановления износа;

5. Совершенствование методов и алгоритмов анализа технического состояния крупных электростанций по их технико-экономическим показателям на примере энергоблоков ТЭС мощностью 300 МВт. Методы и алгоритмы должны обеспечить более полное использование резервов теплового КПД, возможность ранжирования энергоблоков и выявления их "слабых звеньев", распределение нагрузки между энергоблоками, срок службы которых превышает расчетный, а

экспериментальные энергетические характеристики не соответствуют фактическим.

Научная новизна.

Заключается в новых методах и алгоритмах автоматизированного управления эксплуатационной надежностью оборудования и устройств ЭЭС и состоит в следующем:

1. Показатели и характеристики эксплуатационной надежности объектов ЭЭС вычисляются с учетом многомерного характера статистических данных эксплуатации. Новые методы и алгоритмы расчета основаны на имитационном моделировании закономерностей распределения случайных величин, математическом аппарате теории проверки статистических гипотез и теории фидуциальных интервалов;
2. Установлено, что несоответствие точности существующих методов моделирования случайных величин по статистической функции распределения проявляется лишь при числе реализаций выборки $n_v \leq 20$, и проявляется в расхождении параметров разброса. Рекомендуются новый метод моделирования случайных чисел по статистической функции распределения;
3. Разработаны методы, алгоритмы и программы оценки целесообразности классификации статистических данных об износе, дефектах и отказах путем сопоставления статистических функций распределения совокупности данных и выборки. Бесконтрольная классификация конечной совокупности многомерных статистических данных по заданным разновидностям признаков приводит к искажению реальных значений показателей и характеристик надежности энергоустановок, снижению точности их расчета;
4. Показано, что для непрерывных случайных величин оценка целесообразности классификации данных путем сопоставления граничных значений доверительных интервалов показателей надежности связана с занижением фактического риска ошибочного решения. Повышение

точности расчета достигается переходом к граничным значениям фидуциальных интервалов;

5. Показано, что ранжирование может быть выполнено двояко. Первый метод основан на анализе целесообразности классификации малочисленных многомерных количественных данных. Второй метод основан на ранжировании объектов по интегральному показателю. Этот метод достаточно прост, позволяет учесть данные не только с количественной, но и с порядковой шкалой измерения. Однако он не учитывает случайный характер интегральных показателей. Анализ результатов расчетов показывает, что наименее и наиболее надежные и экономичные объекты оба метода распознают достаточно хорошо. Различие в ранжировке наблюдается в средней части вариационного ряда. Здесь располагаются объекты, интегральные показатели, которых незначительно отличаются от усредненной оценки этого показателя;
6. Разработаны методы, алгоритмы и программы распознавания «слабых звеньев», оценки качества управления режимами работы объектов, качества сохраняемости объектов при вынужденном простое, качества восстановления износа;
7. Объективность решения эксплуатационных задач повышается путем привлечения сведений о закономерности изменения технико-экономических показателей во времени. Показано, что зависимость изменения нормированных значений технико-экономических показателей оказывается более информативной, чем зависимость изменения их абсолютных значений;
8. Показано, что при ранжировании энергоблоков ТЭС, интегральные показатели надежности и экономичности работы должны отражать особенности независимых технико-экономических показателей, как энергоблока, так и его наиболее значимых установок;
9. Разработан новый метод, алгоритм и программа распределения нагрузок между энергоблоками ТЭС, учитывающих не только техническое состояние и

экономичность каждого энергоблока, но и изменение состава работающих энергоблоков. Применение метода рекомендуется при несоответствии экспериментальных энергетических характеристик реальным характеристикам.

Теоретическая и практическая ценность работы.

Результаты, полученные в работе, имеют как теоретическое, так и прикладное значение.

Теоретическое значение работы заключается в том, что исследован класс задач, имеющее огромное значение при работе с ограниченными статистическими данными. Новый подход при имитационных моделированиях. Методологии при определении целесообразности и значимости классификации. Указаны пути нахождения критических значений при оценке надежности и экономичности электрооборудований. Применимость фидуциальных интервалов для точного определения границы истинного значения. Научно обоснованы и показаны эффективности ранжирования оборудования и устройств по их надежной работе при эксплуатации.

Практическая ценность работы состоит в том, что совершенствование управления эксплуатационной надежностью иллюстрируется преимущественно на примерах котельных установок энергоблоков 300 МВт ТЭС на газо-мазутном топливе на основе среднемесячных значений технико-экономических показателей.

1. Предлагается традиционную информацию об оценках технико-экономических показателей дополнить сведениями:
 - о результатах ранжирования котельных, турбинных установок и энергоблоков ТЭС;
 - о «слабых звеньях» каждого объекта и совокупности объектов;
 - о качестве управления режимами, сохраняемости и восстановлении износа.

Эти сведения позволяют устранить причины несоответствия технико-экономических показателей предъявляемым требованиям.

2. Анализ результатов изменения технико-экономических показателей выявили неиспользование больших резервов тепловой экономичности вследствие недостатков технического обслуживания и ремонта. Своевременное их устранение позволяет обеспечить безаварийную работу, уменьшить удельный расход условного топлива;
3. Установлено, что недостаточный учет технического состояния объектов при распределении нагрузки приводит к значительным потерям топлива. Экспериментальные исследования показывают, что минимальная нагрузка для наименее надежного и экономичного энергоблока назначается в 77,8% случаев, а максимальная нагрузка на наиболее надежном и экономичном энергоблоке назначается лишь в 36% случаев. Таким образом, важность и необходимость оперативного ранжирования энергоблоков не вызывает сомнения;
4. Разработана структура распределения специализированных форм с результатами анализа технико-экономических показателей между «потребителями» этой информации, существенно повышающих эффективность рекомендуемых ПТЭ ежемесячных обсуждений итогов управления эксплуатационной надежностью и экономичности энергоблоков;
5. Экономический эффект от распределения нагрузки между энергоблоками с учетом их технического состояния составляет примерно 0,2-0,3% от суммарного расхода условного топлива.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конкуренция, образование», Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008;

- Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», 2013 (Баку);
- международной научно-практической конференции «Современные научно-технические и прикладные проблемы энергетики» Сумгаит, 2015;
- международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», 2015 (Минск);
- научно-технических семинарах АзНИиПИИ Энергетики 2009-2020г.г.
- Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», 2017 Кыргызстан;
- The 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications 26-28 August 2020, Baku, Azerbaijan

Применение работы.

Полученные в диссертационной работе результаты исследований используются в соответствующих технических отделах Управлений и на самой крупной электростанции энергосистемы «Азербээнержи» – Азербайджанской ТЭС при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте оборудования, контроле качества ремонта и выполнения гарантированных обязательств. Заинтересованность энергосистемы и электростанции в полученных результатах подтверждается соответствующим актом и протоколом обсуждения результатов на выездном заседании Научного Совета Института, проведенном на Азербайджанской ТЭС (протокол № 5 от 23.05.2016 г.).

Публикации.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 60 печатных работах, в том числе 44 статьи в

зарубежных научных журналах, 6 из них входят в SCOPUS, 3 – в международную базу данных Web of Science™ Core Collection агентства Clarivate Analytics, 8 статей в республиканских научных журналах, 8 в сборниках научных международных конференций.

Наименование учреждения, где выполнена диссертационная работа.

Результаты исследований и разработок проводились по утвержденным энергосистемой «Азерэнержи» планам научно-исследовательских работ и включены в отчеты лаборатории «Надежность энергетического оборудования» Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института Энергетики за 2008-2020гг.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, списка литературы из 211 наименований и Перечень условных обозначений и сокращений. Общий объем диссертации составляет 322 страниц машинописного текста, основной объем-293 страниц (586000 знаков), включая 72 таблиц, 59 рисунков. В частности, первая глава состоит из 144000, вторая-42000, третья-80000, четвертая-70000, пятая-74000 знаков.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи, указаны методы исследования, показана научная новизна и практическая ценность, приведена структура диссертации.

В первой главе диссертационной работы приводятся методы и алгоритмы оценки целесообразности классификации статистических данных при расчетах показателей и характеристик индивидуальной надежности оборудования и устройств ЭЭС. Исследования проводятся на основе имитационного моделирования реальных закономерностей изменения реализаций случайных величин длительности простоя в аварийном ремонте по статистическим функциям их

распределения (с.ф.р.). Установлена недопустимая погрешность разброса случайных величин, моделируемых известными методами.

Отмечается многогранность решения этой задачи. Методы контроля целесообразности классификации данных зависят от типа показателей и характеристик надежности решаемых эксплуатационных задач, характера изменения случайных величин. В работе приводятся результаты исследования наиболее сложного случая оценки статистической функции распределения для заданной разновидности признака. Аналогом решаемой задачи является критерий Колмогорова с той существенной разницей, что статистическая функция распределения здесь сопоставляется с аналитическим распределением случайной величины. Практическое применение этого критерия нередко ошибочно, т.к. с критическим значением сопоставляется не статистика Колмогорова, а сходная с ней величина наибольшего расхождения между заданной функцией распределения и статистической функцией распределения случайной выборки.

Исследование этого важного вопроса позволило выявить основную причину этой ошибки и указать путь ее устранения. Показано, что снижение риска ошибочного решения в ситуации, когда расхождение между функциями распределения вызывает сомнение, достигается учетом величины ошибки второго рода. Применение метода решения обратной задачи позволило установить, что риск ошибочного решения определяется статистическими свойствами выборок. Указанными выше критериями представительность выборки распознается лишь при условии, если значимость статистики «наибольшее значение случайной величины» по сравнению с остальными статистиками существенно выше.

Рекомендуется новый метод и алгоритм моделирования. С.ф.р. рекомендуется представить следующим уравнением:

$$F_3^*(X) = \begin{cases} 0 & \text{если } X \leq X_1 \\ \frac{i-1}{n+1} + \frac{(X-X_i)}{(n+1) \cdot (X_{i+1}-X_i)} & \text{если } X_1 < X < X_{n+1} \\ 1 & \text{если } X \geq X_{n+2} \end{cases} \quad (1)$$

где $i=1,(n+1)$

При этом расчет реализации случайной величины X выполняется по формуле:

$$X = X_i + (X_{i+1} - X_i) \cdot [\xi \cdot (n+1) - (i-1)] \quad (2)$$

где $i=1,(n+1)$; ξ -случайная величина с равномерным распределением в интервале $[0,1]$.

Графическая иллюстрация методов моделирования приведена на рис.1.

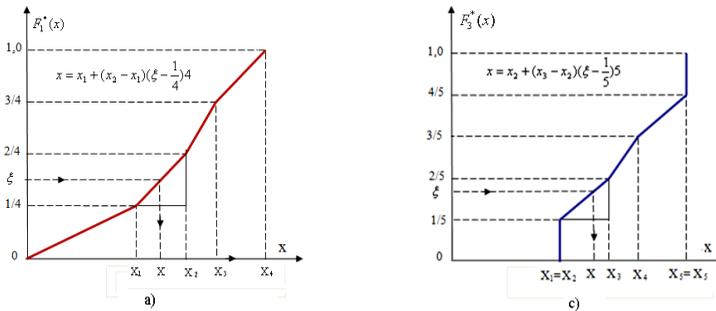


Рисунок 1. Иллюстрация методов моделирования непрерывных случайных величин по эмпирическому распределению.

а- традиционный метод; с- рекомендуемый метод.

Экспериментальные исследования позволили заключить¹:
 – влияние малого объема выборки n_v случайных величин x на характер изменения их с.ф.р. моделируемой $F^{**}(x)$ может быть снижено учетом степени соответствия с.ф.р. $F^*(\xi)$ выборки псевдослучайной величины ξ того же объема равномерному закону в интервале $[0,1]$. Последствия увеличения уровня значимости такого соответствия α аналогичны последствиям искусственного увеличения n_v на величину $(1-\alpha)^{-1}$

- сопоставление методов моделирования свидетельствует о несоответствии традиционного метода требованиям к точности расчета, как для среднего арифметического значения, так и среднеквадратического значения моделируемых реализаций случайных величин при малом объеме выборки
- рекомендуемый метод лишен этих недостатков.

Алгоритм сопоставления методов моделирования приведен в рис.2.

Необходимость в классификации статистических данных обуславливается их зависимостью от ряда признаков и их разновидностей, т.е. их многомерностью. Применение классических методов анализа выборок из генеральной совокупности для анализа выборок из многомерных данных приводит к увеличению риска ошибочного решения.

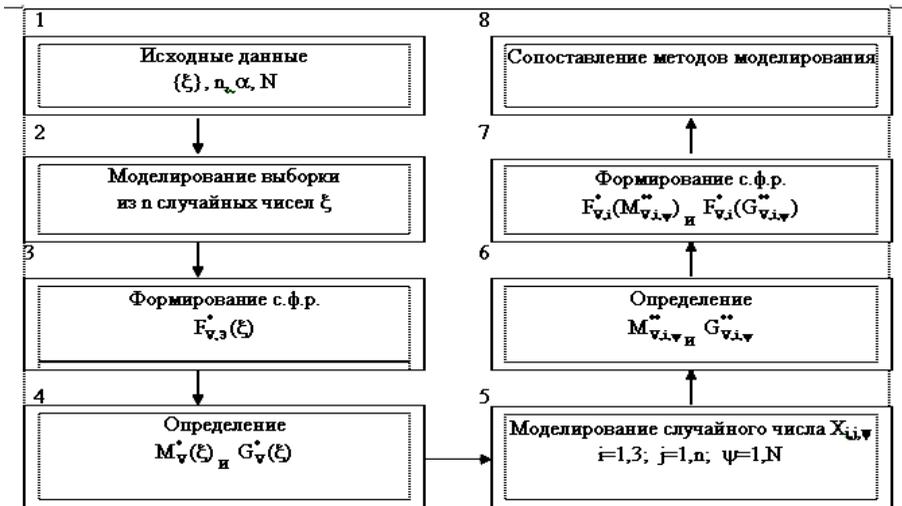


Рисунок 2. Укрупненная блок-схема алгоритма сопоставления методов моделирования непрерывных случайных чисел.

¹ Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев, – Москва: «Наука», - 1965, - 524 с.

Бесконтрольная классификация конечной совокупности многомерных статистических данных по заданным разновидностям признаков, например, по классу напряжения, месту установки, длительности эксплуатации и др. может привести к искажению реальных значений показателей и характеристик надежности энергоустановок. При анализе надежности оборудования ЭЭС классификация статистических данных эксплуатации по одному, а иногда и по двум признакам, задаваемых паспортными данными и данными условий эксплуатации. Показатели надежности электрооборудования различного класса напряжения. Изредка приводятся ПН электрооборудования, сгруппированного по типу или назначению, конструктивному исполнению, сроку службы, заводу-изготовителю и другим признакам. Классификация статистических данных более чем по двум признакам не практикуется. Причиной тому является многообразие разновидностей признаков (РП) и снижение точности оценок ПН (увеличение ширины доверительного интервала). Снижение точности происходит в рамках предположения о соответствии статистических данных случайной выборке из некоторой генеральной совокупности. На самом деле:

1. Статистические данные, характеризующие надежность оборудования ЭЭС (сведения о нерабочих состояниях), зависят от большого числа паспортных и эксплуатационных данных (места установки, класса напряжения, конструктивного исполнения, срока службы и др.) и потому *не могут рассматриваться* ни как аналог генеральной совокупности, ни как *конечная выборка однородных данных*. В математике такие данные принято называть многомерными. К сожалению, аналитические методы анализа многомерных данных (МД) разработаны лишь для предположения о соответствии распределения случайных величин некоторому одному, преимущественно нормальному закону распределения. Это совершенно не соответствует реальным гистограммам распределения, построенным по статистическим данным эксплуатации электрооборудования. В качестве примера на рис.3

приведены гистограммы длительности аварийного отключения (τ_a) энергоблоков 300МВт. Первая гистограмма характеризует распределение по данным эксплуатации восьми энергоблоков за период 1992-2006 г.г. Вторая гистограмма характеризует распределение $P^*(\tau_a)$ всех энергоблоков за 2005 г. Число случаев аварийных отключений для этой выборки снизилось с 634 до 48. На третьей гистограмме показано распределение $P^*(\tau_a)$ для первого энергоблока в 2005г. Сопоставление характера изменения этих гистограмм и закономерности изменения нормального распределения подтверждает малую вероятность соответствия $P^*(\tau_a)$ одному конкретному и, в частности, нормальному закону распределения.

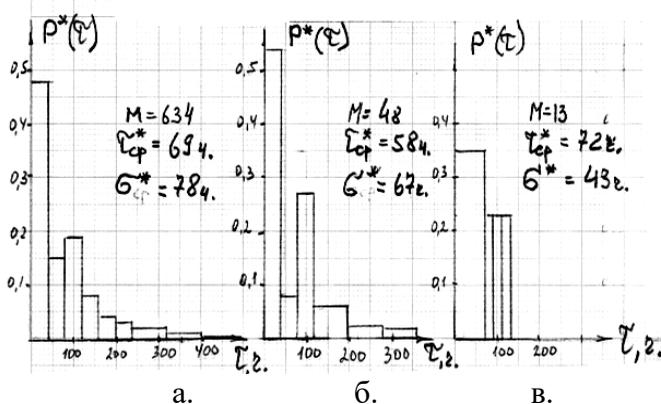


Рисунок 3. Гистограммы продолжительности простоя ЭБ 300МВт в аварийном ремонте. а. Сведения по восьми ЭБ за 5 лет наблюдения; б. То же, но за один год наблюдения; в. Сведения по одному ЭБ за один год наблюдения.

2. При классификации многомерных статистических данных по заданной РП, выборочные данные извлекаются из конечной совокупности многомерных данных не случайно. Например, неслучайно выбираются все выключатели с номинальным напряжением 110кВ. Уточним эту особенность. Неслучайная выборка:

- состоит из случайных величин;

– число случайных величин выборки n_v случайно изменяется во времени, например, возрастает;

– особенности распределения в интервале изменения случайных величин конечной совокупности многомерных данных зависит от РП;

3. Тип закона распределения конечной совокупности многомерных статистических данных не только не известен. Он систематически случайно меняется по мере накопления статистических данных;

4. *Интервал изменения случайной величины в выборке из конечной совокупности многомерных статистических данных по заданной РП не больше, чем интервал изменения случайной величины в самой конечной совокупности.*

Напомним, что для генеральной совокупности случайной величины среднее квадратическое отклонение всегда меньше, чем среднее квадратическое отклонение для любой по численности представительной выборки и с уменьшением числа случайных величин в выборке n_v оценка среднее квадратического отклонения возрастает.

Эти особенности позволяют заключить, что *применение классических методов анализа выборок из генеральной совокупности для анализа выборок из конечной совокупности многомерных данных приводит к увеличению риска ошибочного решения.*

В иллюстративных целях для снижения размерности вычислений в таблице 1 приведены сведения о длительности $M=44$ случаев аварийного простоя энергоблоков 300 МВт за некоторый интервал времени. Статистические функции распределения $F_i^*(\tau_a)$ с $i=1,8$ задают модель вероятности распределения. Сопоставление этих гистограмм подтверждает малую вероятность соответствия одному конкретному и, в частности, нормальному закону распределения. В таблице 1 приведены реализации длительности простоя энергоблоков в аварийном ремонте в течение года работы.

Таблица 1.

Сведения о длительности простоя энергоблоков в аварийном
ремонте

i	Порядковые номера энергоблоков							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	64,42	46,12	78,59	61,36	63,5	9,15	66,29	36,05
2	15,31	46,27	3,36	236,3	38,08	91,17	7,02	6,23
3	53,5	298,58	3,48	123,59		99,51	93,13	15,35
4	94,55	134,12	42,05	358,15		39,11	54,03	
5	69,37	35,51	45,158			133,24	78,21	
6	5,48		62,36				57,2	
7	185,0		18,15				66,1	
8			29,42				1,3	
9			7,43					
10			25,5					
$M_v^*(\tau_{ав})$	69,7	112,1	32	195	51	82,4	58	19,2

Примечание: $M_{\Sigma}^*(\tau_{ав}) = 72,2$ час

При среднем значении длительности простоя 72,2 час, средние длительности простоя каждого энергоблока могут существенно различаться.

Целесообразность классификации статистических данных в обоих примерах требует объективного обоснования.

Разработан новый метод, алгоритм и программа оценки целесообразности классификации статистических данных. В основе метода находятся имитационное моделирование² реализаций случайных величин, теория проверки статистических гипотез и граничные значения фидуциальных интервалов. Суть метода сводится к следующей последовательности вычислений:
- исходные данные: в эмпирической таблице задана некоторая конечная совокупность многомерной случайной величины τ .

² Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. - Москва: Наука, - 1978, - 400 с.

Численные значения τ зависят от m_Σ признаков. Каждый из m_Σ признаков представлен одной из m_i разновидностей признаков (РП) с $i=1, m_\Sigma$. $F^*(\tau)$ - с.ф.р., а $M_\Sigma^*(\tau)$ - среднее значение случайной величины τ . Задана неслучайная выборка реализаций τ , как результат классификации конечной совокупности многомерных данных по заданной РП. С.ф.р. этой выборки $F_{v,y}^*(\tau)$, а среднее значение- $M_{v,y}^*(\tau)$, n_v - число случайных величин в выборке;

– для каждой реализации τ_j выборки с $j=1, n$ вычисляется абсолютная величина отклонения $\Delta_{j,y} = |F_{\Sigma,y}^*(\tau_j) - F_{v,y}^*(\tau_j)|$, $j=1, n$

и далее определяется наибольшее эмпирическое отклонение $\Delta_y^* = \max \{ \Delta_\xi \}_n$;

– вычисляется фидуциальное распределение реализаций абсолютной величины наибольшего отклонения $F_v^{**}[\Delta(H_1)]$ при случайном характере расхождения с.ф.р. совокупности данных по формуле 2 $F_\Sigma^*(\tau)$ и моделируемой выборке $F_v^{**}(\tau)$, где H_1 свидетельствует о случайном характере расхождения $F_\Sigma^*(\tau)$ и $F_v^{**}(\tau)$;

– аналогично вычисляется фидуциальное распределение $F_v^{**}[\Delta(H_2)]$, с той существенной разницей, что моделирование по формуле 2 выборки из n_v значений случайной величины τ проводится не по $F_{\Sigma,y}^*(\tau)$, а по $F_{v,y}^*(\tau)$;

– вычисляются средние арифметические значения реализаций $M^*(\Delta/H_1)$ и $M^*(\Delta/H_2)$;

– по фидуциальным распределениям $F_v^{**}[\Delta(H_1)]$ и $F_v^{**}[\Delta(H_2)]$ вычисляются граничные значения фидуциальных интервалов по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } M^*(\Delta/H_1) < M^*(\Delta/H_2) \\ \text{то } \left\{ \begin{array}{l} 1 - F_v^{**}[\overline{\Delta(H_1)}] = \alpha \\ F_v^*[\underline{\Delta(H_2)}] = \beta \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } M^*(\Delta/H_1) > M^*(\Delta/H_2) \\ \text{то } \left\{ \begin{array}{l} 1 - F_v^{**}[\overline{\Delta(H_2)}] = \alpha \\ F_v^*[\underline{\Delta(H_1)}] = \beta \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (4)$$

- решение о случайном характере расхождения $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_v^*(\tau)$, т.е. о нецелесообразности классификации данных принимается:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } M^*(\Delta/H_1) < M^*(\Delta/H_2) \\ \text{и } \overline{\Delta(H_2)} < \Delta_y^* < \overline{\Delta(H_1)} \\ \text{или если } M^*(\Delta/H_1) > M^*(\Delta/H_2) \\ \text{и } \underline{\Delta(H_1)} < \Delta_y^* < \underline{\Delta(H_2)} \end{array} \right\} \quad (5)$$

Экспериментальные исследования позволили установить, что:

- оценка целесообразности классификации данных путем сопоставления граничных значений доверительных интервалов показателей надежности связана с увеличением риска ошибочного решения;
- ошибочность использования абсолютной величины наибольшего расхождения $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_v^*(\tau)$ вместо расчетной величины статистики Колмогорова³ заключается в различии их функций распределения, а следовательно и критических значений;

³Кендалл, М.Дж. Теория распределений. Пер. с англ. Под ред. А.Н. Колмогорова / М.Дж. Кендалл, А. Стьюарт - 1966, - 587 с.

– уравнение регрессии граничных значений фидуциальных интервалов, полученные по стандартной программе степенного преобразования с коэффициентом детерминации R^2 : ($R^2 > 0,999$) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta(H_1) &= -An_v^{-0,5} \\ \overline{\Delta(H_1)} &= -\left[\Delta(H_1) - n_v^{-1}\right] \text{ где } A=0,652 * \alpha^{-0,175} \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{При } \alpha = 0,05 \quad \Delta(H_1) &= -1,12 n_v^{-0,5} \\ \overline{\Delta(H_1)} &= (1 - 1,12 n_v^{0,5}) n_v^{-1} \end{aligned} \right\} (7)$$

– снижение риска ошибочного решения достигается учетом значимости различия параметров распределения случайных величин расхождения (с.ф.р.) совокупности и выборки данных.

В этой связи возникает необходимость в моделировании статистических функций распределения статистических параметров случайных величин. Результаты этих исследований приведены во второй главе работы.

Во второй главе диссертационной работы приведены методы и алгоритмы расчета критических значений параметров, характеризующих статистические свойства выборок случайных величин и способствующих преодолению трудностей объективной оценки целесообразности классификации многомерных данных.

Из располагаемого множества параметров, рассмотрено абсолютное значение наибольшего вертикального расхождения статистических функций распределения совокупности данных и выборки, среднее арифметическое значение вертикальных расхождений и показатели разброса - среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации и размах рассеяния случайных величин. Получены табличные значения квантилей статистической функции их распределения для ряда значений числа случайных величин выборки, что позволяет оценить граничные значения их изменения с заданным уровнем доверия.

Приведена графическая иллюстрация их изменения для ряда числа случайных величин выборки.

По сути, эти методы подобны методу расчета критических значений наибольшего значения вертикального расхождения между $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_V^*(\tau)$ и различаются лишь формулами расчета статистических параметров. В диссертации анализируются следующие статистические параметры:

1. Наибольшее абсолютное значение вертикального расхождения между $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_V^*(X)$. Вычисляется по формуле:

$$B_V(\Delta) = \max \{ |\Delta_1|; |\Delta_2|; \dots; |\Delta_{n_v}| \} \quad (8)$$

2. Среднее значение вертикального расхождения. Вычисляется по формуле:

$$M^*[\Delta] = n_v^{-1} \sum_{i=1}^{n_{v,i}} |\Delta| \quad (9)$$

3. Среднеквадратическое значение вертикального расхождения. Вычисляется по формуле:

$$\sigma^*[\Delta] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_v} [M^*(\Delta) - |\Delta|]^2}{(n_v - 1)}} \quad (10)$$

4. Размах рассеивания случайных величин вертикального расхождения. Вычисляется по формуле:

$$L_V^* = \Delta_{\max} - \Delta_{\min} \quad (11)$$

Все эти статистические параметры по-своему чувствительны к различию между $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_V^*(\tau)$.

Само исследование включало следующие этапы:

– моделирование фидуциальных распределений возможных реализаций анализируемых статистических параметров случайных величин вертикального расхождения распределений $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_V^*(\tau)$ для различных значений объема выборки n_v . Закономерности изменения фидуциальных распределений $R^*[B_V^*(\Delta/H_1)] = 1 - F^*[B_V^*(\Delta/H_1)]$ и $F^*[B_V^*(\Delta_v/H_2)]$ для третьего и восьмого энергоблоков (см.табл.1) приведены на рис. 4. Для сравнения на

рис.5 приведены кривые фидуциального распределения $R^*[M_v^*(\Delta/H_1)] = 1 - F^*[M_v^*(\Delta/H_1)]$ и $F^*[M_v^*(\Delta/H_2)]$

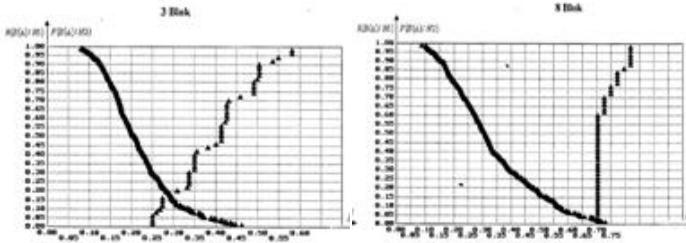


Рисунок 4. Графическая иллюстрация с.ф.р. $R^*[B_v(\Delta/H_1)]$ и $F^*[B_v(\Delta/H_2)]$, 3 и 8 энергоблоков

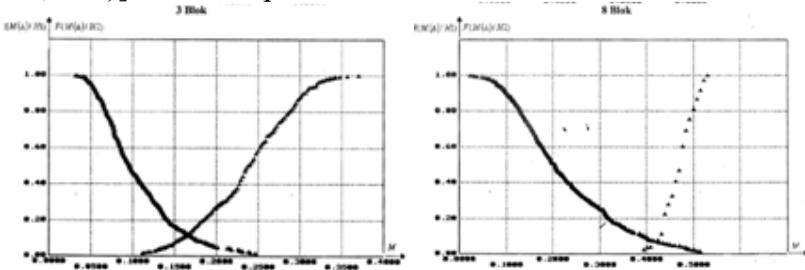


Рисунок 5. Иллюстрация с.ф.р. $R^*[M_v(\Delta/H_1)]$ и $F^*[M_v(\Delta/H_2)]$: 3 и 8 энергоблоков.

Обращает внимание недостаточный уровень дискретизации распределений $F^*[B_v^*(\Delta/H_2)]$, создающий трудности при оценке нижнего граничного значения фидуциального интервала $B_v(\Delta/H_2)$ для заданной ошибки второго рода β .

– нахождение аналитической взаимосвязи граничных значений фидуциальных интервалов и объема выборки n_v для фиксированного значения ошибок первого и второго рода. О наличии такой зависимости свидетельствует соотношение фидуциальных распределений $R^*[B_v^*(\Delta/H_1)]$ и $R^*[M_v^*(\Delta/H_1)]$ для 3 и 8 энергоблоков, объем выборок, которых n_v соответственно равен 10 и 3 реализациям.

В иллюстративных целях на рис.6 приведены типовые кривые зависимости $G_v^*(\Delta/H_1)$ от n_v для $\alpha = 0,05$ и $\alpha = 0,5$

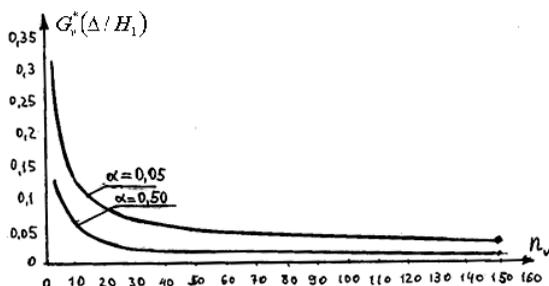


Рисунок 6. Закономерности изменения критических значений статистики в зависимости от n_v

Установлено, что с коэффициентом детерминации R^2 не ниже 0,98 уравнение взаимосвязи имеет вид:

$$St(\Delta / H_1) = A * n_v^{-b} \quad (12)$$

где: $St(\Delta / H_1)$ - условное обозначение группы рассматриваемых статистических параметров.

В таблице 2 приведены коэффициенты уравнения (12) для ряда $St(\Delta / H_1)$.

Таблица 2.

Результаты расчета постоянных коэффициентов уравнения (12) для $\alpha = 0,05$.

$St^*(\Delta / H_1)$	Коэфф. регрессии		R^2
	A	B	
$B_v^*(\Delta / H_1)$	1,08	0,46	0,9998
$M_v^*(\Delta / H_1)$	0,81	0,58	0,9961
$G_v^*(\Delta / H_1)$	0,43	0,54	0,997

– оценку целесообразности классификации статистических данных по заданной РП проводится путем сопоставления с критическими значениями ошибок первого и второго рода, принятых равными $\alpha_k = \beta_k = 0,05$. В качестве примера в таблице 3 приведены оценки целесообразности классификации

длительности простоя в аварийном ремонте (см.табл.1) по номерам энергоблоков.

Таблица 3.

Результаты оценки целесообразности классификации данных табл.1 по параметру $B_v^*(\Delta)$.

Показатель	Порядковый номер энергоблока							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_v(\Delta)$	0,127	0,168	0,414	0,364	0,368	0,173	0,205	0,705
$R^*[(\Delta/H_1)]$	0,922	0,816	0,021	0,287	0,49	0,832	0,575	0,028
$F^*[(\Delta/H_2)]$	0,108	0,308	0,585	0,451	0,553	0,285	0,341	0,553
H	H ₁	H ₁	H ₂	H ₁	H ₁	H ₁	H ₁	H ₂

Сопоставление данных таблицы с критическими значениями ошибок первого и второго рода свидетельствует о том, что такая классификация целесообразна лишь для третьего и восьмого энергоблоков. Показано, что дискретный характер распределения реализаций статистических параметров $St_v(\Delta)$ обуславливает неприемлемость критериев, основанных на сравнения квантилей распределения $F^*[St_v(\Delta)]$. Проверка гипотез в этих условиях должна проводится по критериям, основанных на сравнении $R^*[St_{v,\alpha}(\Delta/H_1)]$ и α_k и $R^*[St_{v,\beta}(\Delta/H_2)]$ и β_k .

В третьей главе диссертационной работы завершается решение одной из основных задач оценки ПН объектов ЭЭС по многомерным малочисленным данным оценки целесообразности классификации данных. Множество статистических параметров распределений $F_v^*(\Delta)$ обуславливают множество критериев и громоздкость вычислений.

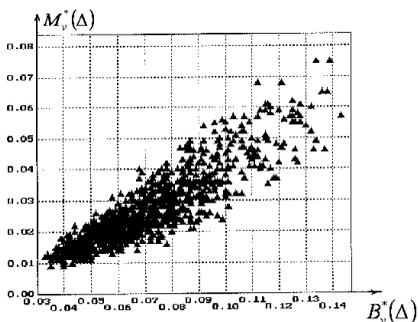
В начальной части главы решается проблема множества критериев, основанных на сопоставлении параметров, характеризующих статистические свойства реализации вертикального расхождения статистические функции распределения совокупности данных и выборки. Уменьшение числа критериев достигается выбором независимых статистических параметров. Взаимосвязь параметров оценивалась коэффициентом корреляции. Установлено, что независимыми параметрами являются: абсолютная величина

наибольшего расхождения, среднее арифметическое значение и размах рассеяние реализаций вертикального расхождения статистических функций распределения совокупности данных и выборки.

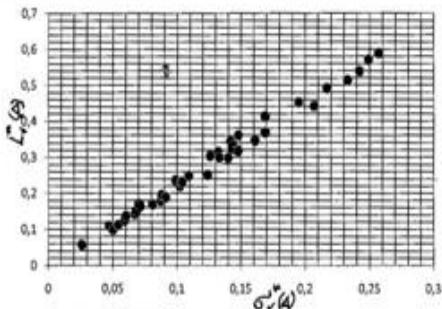
Далее приводится метод и алгоритм количественной оценки надежности кластеров объектов ЭЭС. Под кластерами понимаются группы объектов, показатели индивидуальной надежности которых различаются неслучайно. Следует отметить, что кластеры объектов не являются постоянными. Они зависят от показателей надежности и времени также, как и показатели индивидуальной надежности. Несомненный интерес вызывают вопросы о сопоставлении усредненной и индивидуальной надежности, об оптимальном числе признаков и их разновидностей. Ответом на эти вопросы завершается материал третьей главы работы. Снижение числа критериев достигнуто реализацией основного требования – использованием независимых критериев.

На рис.7 приведены примеры, характеризующие степень взаимосвязи статистических параметров⁴

⁴ Bonferroni, C.E. "Il calcolo delle assicurazioni su gruppi di teste." In Studi in Onore del Professore Salvatore Ortu Carboni. Rome: Italy, - 1935. p. 13-60.



а)



б)

Рисунок 7. Примеры взаимосвязи статистических параметров распределений $F_v^*(\Delta)$

Результаты исследований позволили рекомендовать для оценки целесообразной классификации статистических данных следующие параметры: $B_v^*(\Delta)$, $M_v^*(\Delta)$, и $L_v^*(\Delta)$, каждый из которых наиболее полно характеризует наибольшее расхождение распределений $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_v^*(\tau)$, их среднее значение и разброс. Применение трех статистических параметров, а следовательно и трех критериев полностью согласуется с рекомендациями академика Б.В. Гнеденко⁵ о проведении проверок гипотез одновременно по нескольким критериям, каждый из которых устанавливает расхождение $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_v^*(\tau)$ лишь для определенного типа $P_v^*(\tau)$.

Возможность оценки целесообразности классификации статистических данных позволяет:

- составить перечень значимых разновидностей каждого признака и тем самым уточнить закономерности и причины изменения надежности объектов ЭЭС;

⁵ Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев, – Москва: «Наука», - 1965, - 524 с.

- оценить показатели индивидуальной надежности;
- оценить показатели надежности кластеров объектов ЭЭС.

Алгоритм решения каждой из выделенных трех задач своеобразен. При формировании перечня значимых разновидностей каждого признака требуется оценить не только целесообразность классификации путем сопоставления с.ф.р. $F_{\Sigma}^*(\tau)$ и $F_{v,i}^*(\tau)$ с $i=1, m_{\Sigma}$, но и характер расхождения между с.ф.р. значимых признаков. Блок-схема алгоритма рекомендуемого метода решения этой задачи приведена на рис.8. При оценке показателей индивидуальной надежности снижение громоздкости вычислений достигается путем сопоставления расчетных значений статистических параметров с.ф.р. $F_v^*(\Delta)$: $B_v^*(\Delta)$, $M_v^*(\Delta)$ и $L_v^*(\Delta)$ выборок, соответствующих заданным РП.

$$R_{v,i}^*[St(\Delta)] = \min \{R_v^*[B_{v, \max}^*(\Delta)]; R_v^*[M_{v, \max}^*(\Delta)]; R_v^*[L_{v, \max}^*(\Delta)]\} \quad (13)$$

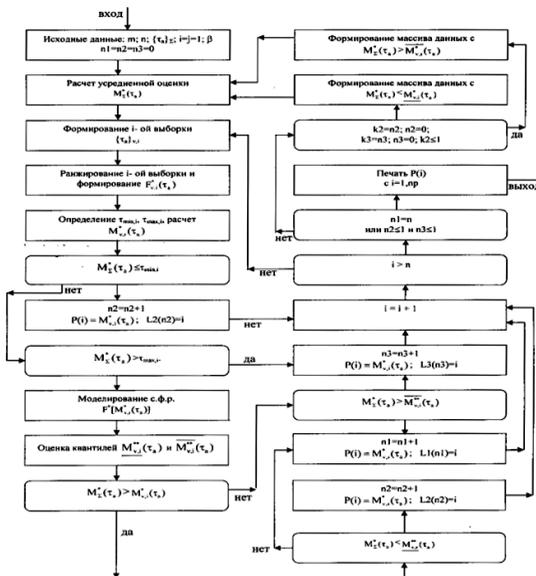


Рисунок 8. Блок-схема алгоритма формирование перечня значимых разновидностей признаков.

Суть алгоритма сводится к следующей последовательности вычислений:

– на первом этапе определяется наиболее значимое из РП. Методология решения этой задачи рассмотрена нами ранее. Обозначим выборку, соответствующую наиболее значимой РП как $\{X(i, j)\}_V$, где $i=1, n$, $j=1, r_i$, а порядковый номер этого РП - (i, j) ;

– проводится проверка предположений о характере расхождения $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,p}^*(X)$. Если предположение H_2 об отличии $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,p}^*(X)$ отвергается (теоретически это возможно) и данные не противоречат предположению H_1 о случайном характере отличия, то значимые РП отсутствуют, классификация конечной совокупности многомерных данных (МД) нецелесообразна, а ПН вычисляются по конечной совокупности МД. Если с заданным уровнем значимости отвергается предположение H_1 и данные не противоречат предположению H_2 , то переходим ко второму этапу вычислений;

– на втором этапе выполняются вычисления, подобные вычислениям на первом этапе с той существенной разницей, что в качестве конечной совокупности МД берется выборка $\{X(i, j)\}_V$. Из этой конечной совокупности берутся выборки по всем заданным РП, кроме РП с порядковым номером (i, j) . Среди $(n-1)$ выборок находится выборка, относительная величина интервала изменения случайных величин которой наименьшая. С.ф.р. этой выборки сопоставляется с с.ф.р. конечной совокупности МД.

При этом, естественно, возникает вопрос о том, с каким распределением сопоставлять с.ф.р. выборки по двум РП – с исходной с.ф.р. конечной совокупности МД $F_{\Sigma}^*(X)$ или со с.ф.р. конечной совокупности МД, полученной по наиболее значимому признаку $F_{\Sigma}^*(X) = F_{V,1}^*(X)$.

При решении этой задачи следует исходить из следующих трех аксиоматических положений:

П1. Если $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,1}^*(X)$ различаются неслучайно
и если $F_{V,1}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ различаются неслучайно
то $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ также различаются неслучайно

П2. Если $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,1}^*(X)$ различаются случайно
и если $F_{V,1}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ различаются неслучайно,
то $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ также различаются неслучайно

Иначе говоря, пренебрежение случайным характером расхождения $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,1}^*(X)$ ведет к искусственному искажению величины и занижению точности оценки показателей индивидуальной надежности, снижению числа этапов классификации данных, к ошибочному перечню значимых РП.

П3. Если $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,1}^*(X)$ различаются неслучайно
и если $F_{V,1}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ различаются случайно,
то $F_{\Sigma}^*(X)$ и $F_{V,2}^*(X)$ также различаются неслучайно

Положения (П1-П3) свидетельствуют о том, что на каждом i -ом этапе классификации сравниваться должны распределения $F_{V,(i-1)}^*(X)$ и $F_{V,i}^*(X)$. На всех последующих этапах классификации МД проводятся вычисления, аналогичные вышеизложенным, и завершаются при условии, что различие с.ф.р. $F_{V,(i-1)}^*(X)$ и $F_{V,i}^*(X)$ становится случайным.

Следует отметить, что оценки показателей индивидуальной надежности в отличие от нормативов не постоянны, и подвержены определенным изменениям (например, снижение надежности по мере увеличения срока службы, повышение надежности после восстановления износа)⁶.

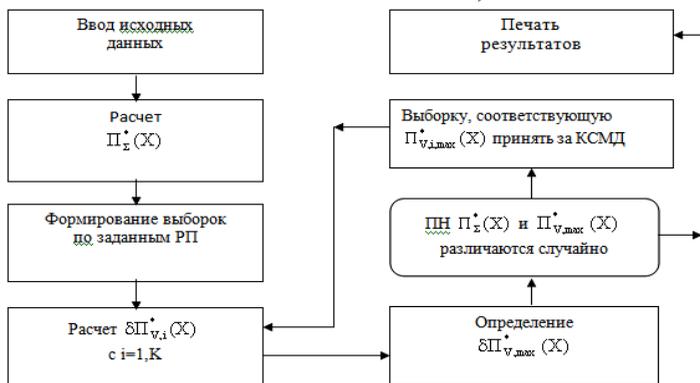


Рисунок 9. Увеличенная блок-схема алгоритма оценки показателей индивидуальной надежности

Результаты расчетов показателей индивидуальной надежности показали, что эти показатели являются количественной характеристикой группы одноименных объектов. В этой связи представила интерес задача классификация множества одноименных объектов на группы (кластеры), показатели надежности, которых различаются неслучайно. Решение этой задачи позволяет ранжировать эти группы по надежности работы и рекомендовать соответствующие их техническому состоянию способы технического обслуживания и ремонта.

⁶ Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб / В. Кельтон. – Питер; - Киев: Издательская группа ВHV, - 2004, -847 с.

Методы расчета показателей индивидуальной надежности объектов и их кластеров различны. Если для показателей индивидуальной надежности исходными данными являются одна разновидность каждого признака (например, линейные (1) элегазовые (2) полонковые (3) выключатели напряжением 110 кВ (4), установленные в закрытом распределительном устройстве (5) и т.д.), то для расчета ПН кластеров учитывается все разновидности признаков.

Суть рекомендуемого метода расчета ПН кластеров сводится к следующей последовательности вычислений:

1. Для каждого из признаков рассматриваемых объектов из общего числа, выделенных РП устанавливаются значимые сочетания РП (см. алгоритм оценки значимости РП). Обозначим число значимых сочетаний разновидностей i -го признака через r_i с $i=1, m$, где m - число признаков объекта;

2. Для каждого признака вычисляются значимые РП и определяются РП с наибольшей оценкой ПН $\Pi_{V,i,max}^*$, где $\Pi_{V,i,max}^* = \max[\Pi_{V,1,1}^*; \Pi_{V,2,2}^*; \dots; \Pi_{C,n,r_i}^*]$; $i=1, n$; n – число признаков; r_i – число значимых разновидностей i го признака;

3. Среди $\Pi_{V,i,max}^*$ с $i=1, n$ определяется наибольшее значение ПН $\Pi_{V,i,max}^* = \max[\Pi_{V,1,max}^*; \Pi_{V,2,max}^*; \dots; \Pi_{C,n,max}^*]$;

4. Выборка реализаций, соответствующих $\Pi_{V,i,max}^*$ представляется как конечная совокупность многомерных данных и для всех значимых сочетаний каждого признака, за исключением соответствующего $\Pi_{V,i,max}^*$, вычисляются наибольшие значения. Классификация этой выборки продолжается до тех пор, пока оценка ПН по конечной совокупности многомерных данных и оценка по выборке с $\Pi_{V,i,max}^*$ не будут расходиться случайно.

При достижении этого события, текущая конечная совокупность многомерных данных изымается из исходной конечной совокупности многомерных данных, а результирующая

анализируется. Процесс классификации продолжается до тех пор, пока различие оценок ПН, и выборки с $\Pi_{V, \max}^*$ не окажется случайным.

В четвертой главе решаются вопросы повышения эффективности анализа технико-экономических показателей котельных установок, энергоблоков ТЭС.

К ним относятся методы ранжирования котельных установок, выявления «слабых звеньев», оценки качества управления режимами работы, качества сохраняемости в период вынужденного простоя и качества восстановления износа в период планового ремонта. Непосредственному применению этих методов предшествует преобразование исходных технико-экономических показателей. Это преобразование включает выбор независимых показателей, координацию их направленности и нормирования.

Поскольку число реализаций технико-экономических показателей равно числу энергоблоков, то коэффициент корреляции имеет случайный характер. Учет этого фактора рекомендуется проводить путем сопоставления критических значений коэффициента корреляции и оценки по эксплуатационным данным. Зависимость может быть принята неслучайной, если оценка коэффициента корреляции превышает критическое значение.

Отмечается ряд используемых на практике способов нормирования показателей. Экспериментальные исследования позволили выявить способ, учитывающий не только различие масштаба измерения, но и разброс значения измеряемого показателя. Преобразовав исходные данные, можно перейти непосредственно к решению отмеченных выше задач, методы, алгоритмы и примеры расчетов которых приводятся в конце четвертой главы.

Разработаны методы и алгоритмы – представляющих - ранжирования и классификации котельных установок блочных ТЭС, преобразования исходных данных, включающего учет взаимосвязи технико-экономических показателей, их

направленности и нормирования. Если для интервальной и номинальной шкал число РП фиксировано, то при количественной шкале измерения классификация требуется разработка специальных подходов. Для предотвращения этих последствий разработан метод классификации данных, который учитывает целесообразность классификации и преодолевает отмеченные выше трудности.

Рекомендуемый алгоритм преобразования исходных данных предусматривает следующую последовательность вычислений:

1. Обеспечение единой направленности воздействия.
2. Классификация данных по взаимосвязанным признакам нецелесообразна, т.к. также приводит к потере информации и росту риска ошибочного решения. Объединение взаимосвязанных разновидностей признаков позволяет существенно снизить их число и упростить расчеты преодоления влияния различных единиц измерения и масштаба показателей достигается нормированием (стандартизацией) количественных оценок. Для этого рассматриваются количественные характеристики как совокупность случайных величин, вычисляется ряд их статистических параметров: среднее арифметическое значение $M_{\Sigma}^*(\Pi_i)$, минимальное $\Pi_{i,\min}$ и максимальное $\Pi_{i,\max}$ значения, разброс $L_{\Sigma}^*(\Pi_i)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\Sigma}^*(\Pi_i)$ по формулам:

$$M_{\Sigma}^*(\Pi_i) = n_{\Sigma}^{-1} \sum_{j=1}^{n_{\Sigma}} \Pi_{i,j}; \quad \Pi_{i,\min} = \min\{\Pi_i\}_{n_{\Sigma}}; \quad \Pi_{i,\max} = \max\{\Pi_i\}_{n_{\Sigma}};$$

$$L_{\Sigma}^*(\Pi_i) = (\Pi_{i,\max} - \Pi_{i,\min}); \quad \sigma_{\Sigma}^*(\Pi_i) = \sqrt{\frac{[\Pi_i - M_{\Sigma}^*(\Pi_i)]^2}{(n_{\Sigma} - 1)}}$$

В таб. 4. Приведены среднемесячные количественные оценки показателей парокотельных установок.

Таблица 4.

**Количественные оценки эксплуатационных показателей КУ
энергоблоков 300 МВт**

N п/п	Эксплуатационный показатель			Условный номер энергоблоков							
	наименование	Усл.об.	Ед.изм.	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Средняя нагрузка	Н _{ср}	т/ч.	757	739	752	797	958	804	804	820
2	Удельный расход питательной воды	Б	т/ч.	780	758	769	815	973	814	820	832
3	Расход тепла «брутто»	Q _б	ГДж/ч.	2061	2019	2052	2161	2554	2178	2178	2215
4	Температура воздуха после РЕП	T _в	°С	261	293	294	305	293	305	325	291
5	Температура уходящих газов	T _{у.г.}	°С	113	109	117	154	110	157	151	146
6	Коэффициент избытка воздуха	K _в	о.е.	1,94	1,16	1,17	1,16	1,11	1,15	1,15	1,18
7	Присос воздуха на тракте	ΔS	%	43,3	41	43	42,6	39,5	41,3	42,8	44,5
8	Потери тепла с уходящими газами	Q _{у.г.}	%	6,51	6,36	6,84	8,68	6,32	8,81	8,72	8,45
9	КПД «брутто»	η _б	%	91,55	90,95	91,21	87,88	92,34	89,45	90,29	88,22
10	Удельный расход ЭЭ на СН	Э _{сн}	%	2,58	2,56	2,39	2,34	2,11	2,46	2,18	2,17
11	Удельный расход ТЭ на СН	Q _{сн}	%	2,45	1,88	1,74	2,62	1,03	2,73	1,98	2,65
12	КПД «нетто»	η _к	%	83	84,5	85,1	83,7	86,1	83	83,6	83,8

Таблица 5.

Результаты расчетов нормированных значений ТЭП КУ

N п/п	Условные номера КУ ЭБ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,2	-0,296	-0,237	-0,031	0,704	0,001	0,001	0,074
2	-0,187	-0,289	-0,238	-0,024	0,711	-0,028	-0,001	0,093
3	-0,218	-0,296	-0,233	-0,030	0,704	0,001	0,001	0,071
4	-0,545	-0,045	-0,029	-0,143	-0,045	0,143	0,455	-0,076
5	0,398	0,482	0,315	-0,456	0,461	-0,518	-0,393	-0,289
6	-0,828	0,111	0,099	0,111	0,172	0,123	0,123	0,087
7	-0,210	0,250	-0,150	-0,070	0,550	0,190	-0,110	-0,450
8	0,432	0,492	0,300	-0,439	0,509	-0,491	-0,455	-0,347
9	0,295	0,160	0,218	-0,528	0,472	-0,176	0,012	-0,452
10	-0,492	-0,449	-0,088	-0,019	0,508	-0,237	0,359	0,380
11	-0,185	0,150	0,232	-0,285	0,650	-0,350	0,155	-0,303
12	-0,355	0,129	0,323	-0,129	0,645	-0,355	-0,161	-0,097
	-0,176	0,033	0,043	-0,143	0,503	-0,142	-0,001	-0,109

Нормированные на основе исходных данных из таблицы 4 результаты расчетов значений технико-экономических показателей КУ приведены в таблице 5.

Проведено ранжирование для независимых технико-экономических показателей КУ. Прежде чем выявить независимые показатели, проводится ранжирование КУ по всем m_{Σ} показателям, для чего, в соответствии с изложенным выше методом, по данным таблицы 5 $m_{\Sigma}=12$ показателей независимых друг от друга. Ранжирование КУ по результатам ранжирования по всей совокупности показателей и выборке из независимых показателей позволило установить, что ранжирование по независимым показателям не изменяет номера самой “плохой” и самой “хорошей” КУ и существенно конкретизирует общее ранжирование.

Разработан новый метод и алгоритм управления надежностью и экономичностью работы. Суть метода сводится к определению «слабых звеньев» и формированию рекомендаций.

Разработаны методы и алгоритмы: формирования основных направлений повышения эффективности работы КУ (рис.10), качества управления режимами работы КУ (рис.11), оценки качества сохраняемости и восстановления износа котельных установок (рис.12) и оценки качества планового ремонта КУ (рис.13). Результаты расчетов служат информационной поддержкой персонала при организации технического обслуживания, испытания и ремонта.

№. КУ	Технико – экономические показатели			
	Наименование	Относит. отклонен.	Фактичес. значения	Рекомед. значения
6	– Коэффициент избытка воздуха	-1.109	1.27	1.17
6	– Температура питательной воды	-.514	236.70	238.11
6	– КПД "Брутто"	-.410	91.12	91.17
6	– Доля ТЭ на С.Н.	-.345	1.55	1.51
6	– КПД "Нетто"	-.221	84.74	84.86
6	– Температура воздуха после РВП	-.189	282.40	283.10
6	– Температура уходящих газов	-.127	113.90	112.67
7	– КПД "Брутто"	-1.280	91.02	91.17
7	– Доля ТЭ на С.Н.	-1.179	1.65	1.51
7	– Температура питательной воды	-.369	237.10	238.11
7	– КПД "Нетто"	-.363	84.67	84.86
7	– КПД "Нетто"	-.363	84.67	84.86
7	– Температура воздуха после РВП	-.135	282.60	283.10
5	– Температура питательной воды	-1.169	234.90	238.11
5	– Температура уходящих газов	-1.147	123.80	112.67
5	– КПД "Нетто"	-.263	84.72	84.86
5	– Доля ТЭ на С.Н.	-.262	1.54	1.51
5	– Доля ЭЭ на С.Н.	-.230	2.42	2.34
3	– Присос воздуха на тракте	-1.042	43.20	38.46
3	– Доля ЭЭ на С.Н.	-1.006	2.68	2.34
3	– КПД "Нетто"	-.931	84.37	84.86
3	– Температура воздуха после РВП	-.297	282.00	283.10
3	– Температура воздуха после РВП	-.297	282.00	283.10
4	– Температура воздуха после РВП	-.784	280.20	283.10
4	– Присос воздуха на тракте	-.757	41.90	38.46
4	– Коэффициент избытка воздуха	-.514	1.22	1.17
2	– Температура уходящих газов	-.281	115.40	112.67
2	– Доля ТЭ на С.Н.	-.179	1.53	1.51
8	– Коэффициент избытка воздуха	-.668	1.23	1.17
8	– Температура воздуха после РВП	-.595	280.90	283.10

2. Коэффициенты значимости технического состояния (ТС) КУ равны:

п/н КУ	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффци. знач. ТС		.292	-.129	.181	-.138	-.295	-.252	.341

3. К группе "плохих" относятся 6,7,5,3, КУ. Рекомендуется снижение их нагрузки обратно пропорционально относительных величин коэффициентов значимости ТС;

4. Наименее эффективной из действующих КУ следует считать 6 КУ. Эта КУ рекомендуется к отключению на плановый ремонт, а предварительно – в резерв или к максимально возможному снижению нагрузки;

5. К группе "хороших" относятся , 8,2,4 КУ. Допускается повышение их нагрузки пропорционально относительным величинам коэффициентов значимости ТС;

6. Наиболее эффективной является 8 КУ. Целесообразна ее работа с номинальной производительностью;

7. Основными причинами снижения эффективности КУ ЭС является несоответствие предъявляемым требованиям показателей:

- Доля ТЭ на С.Н.
- Температура воздуха после РВП

Рисунок 10. Фрагмент результатов формирования основных направлений повышения эффективности работы КУ.

1. Оценка качества

№ КУ	Качество управления	Количественная оценка
1	Удовлетворительное	2.70
2	Удовлетворительное	3.11
3	Удовлетворительное	2.89
4	Неудовлетворительное	2.11
5	Хорошее	3.89
6	Неудовлетворительное	2.22
7	Неудовлетворительное	2.11
8	Удовлетворительное	2.56

2. Последовательность порядковых номеров КУ ранжированных по снижению качества управления имеет вид: **5,2,3,1,8,6,7,4** и не совпадает с последовательностью номеров КУ, ранжированных по ухудшению технического состояния **8,7,6,5,4,3,2,1**.

3. Наиболее высокое качество управления достигнуто персоналом на **5,2** КУ.

4. Наихудшее качество управления на **4,7** КУ.

5. Изменение технико-экономических показателей КУ ЭС

Наименование показателя	Число КУ, показатели которых	
	улучшились	ухудшились
Удельная нагрузка	3	5
Температура воздуха после РВП	6	2
Температура уходящих газов	7	1
Коэффициент избытка воздуха	8	0
Присос воздуха на тракте	2	6
КПД "Брутто"	5	3
Удельный расход ЭЭ на С.Н.	6	2
Удельный расход тепла на С.Н.	5	3
КПД "Нетто"	2	6

6. Технико-экономические показатели КУ, количественные оценки которых ухудшились по сравнению с предшествовавшим периодом

Номер КУ	Наименование показателя	Количественная оценка показателя за периоды	
		предшествовавший	текущий
4	Присос воздуха на тракте	42.6	51.3
4	Удельный расход ЭЭ на С.Н.	2.34	2.52
4	Удельный расход тепла на С.Н.	2.62	2.75
4	КПД "Нетто"	83.7	82.3
7	Температура воздуха после РВП	325	282
7	Присос воздуха на тракте	42.8	49.5
7	КПД "Брутто"	90.29	89.77
7	Удельный расход тепла на С.Н.	1.98	2.74
7	КПД "Нетто"	83.6	83

Рисунок 11. Фрагмент результатов качества управления режимами работы КУ

№ п/п	Технико-экономические показатели				Оценка защиты от воздействия окружающей среды
	Наименование	Количественная оценка			
		До простоя	После простоя		
		КУ	Сред. ТЭС		
1	Удельная нагрузка	34	34.75	33.5	Неудовлетворител
2	Температура воздуха после РВП	261	295.88	280	Удовлетворительн
3	Температура уходящих газов	113	132.13	111	Хорошее
4	Коэффициент избытка воздуха	1.94	1.25	1.13	Хорошее
5	Присос воздуха на тракте	43.3	42.25	43.3	Удовлетворительн
6	КПД "Брутто"	91.55	90.36	89.16	Неудовлетворител
7	Удельный расход ЭЭ на С.Н.	2.58	2.35	4.05	Неудовлетворител
8	Удельный расход тепла на С.Н.	2.45	2.14	1.57	Удовлетворительн
9	КПД "Нетто"	83	84.1	76.3	Неудовлетворител

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: По данным таблицы ЭФ-КУ следует, что: за рассматриваемый период:

- * сохраняемость 1 КУ не удовлетворяет предъявляемым требованиям.
- * показатели изменились следующим образом:
 - ухудшили свое значение 4 показателя;
 - ухудшили свое значение 5 показателем.

Рекомендуется обратить внимание на совершенствование сохраняемости следующих показателей:

- * Удельная нагрузка
- * КПД "Брутто"
- * Удельный расход ЭЭ на С.Н.
- * КПД "Нетто"

Рисунок 12. Фрагмент результатов оценки сохраняемости КУ

п/н	Технико-экономические показатели					Оценка качества ремонта
	Наименование	Количественная оценка			Отклонение	
		До ремонта		После ремонта		
		КУ	Сред. ТЭС			
1	Удельная нагрузка	33.5	34.58	34.5	1	Удовлетворит
2	Температура воздуха после	280	293.63	277	-3	Неудовлетвор
3	Температура уходящих газов	111	131.88	108	3	Показательно
4	Коэффициент избытка воздуха	1.13	1.19	1.16	-0.03	Удовлетворит
5	Присос воздуха на тракте	43.3	46.86	45	-1.7	Удовлетворит
6	КПД "Брутто"	89.16	90.2	91.89	2.73	Хорошее
7	Удельный расход ЗВ на С.Н	4.05	2.51	2.38	1.67	Хорошее
8	Удельный расход тепла на	1.57	2.08	1.28	.29	Хорошее
9	КПД "Нетто"	76.3	82.74	84.5	8.2	Хорошее

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: По данным таблицы 4Ф-КУ следует, что:

- * Качество планового ремонта 1 КУ не удовлетворяет предъявляемым требованиям;
- * Технико-экономические показатели изменились следующим образом:
 - ** улучшили свое значение 8 показателей
 - ** ухудшили свое значение 1 показатель

Рекомендуется при возможности улучшить следующие показатели:

- * Температура воздуха после РВП

Рисунок 13. Фрагмент результатов оценки качества планового ремонта КУ

В пятой главе диссертационной работы приводятся рекомендации по повышению эффективности анализа технико-экономических показателей энергоблоков ТЭС, которые приводят освоению резервов тепловой экономичности энергоблоков, разработан алгоритм ранжирования энергоблоков, с которым мы уже были знакомы в четвертой главе работы, суть изменений сводится к изменению числа исходных данных, а именно перечня технико-экономических показателей. Разработан новый метод, алгоритм и приведены примеры расчета распределения нагрузки между энергоблоками ТЭС.

Традиционно резервы тепловой экономичности осваиваются путем повышения надежности «слабых звеньев», повышения качества управления режимами энергоблока. Анализ Т-ЭП осуществляется путем сопоставления фактических и номинальных показателей. Под номинальными понимаются показатели, отражающие реально достижимую «экономичность» работы оборудования при фактических нагрузках и внешних условиях, состоянии и уровне эксплуатации оборудования, отвечающие требованиям действующих правил эксплуатации электрических станций и сетей».

Своевременное доведение этих расчетов до оперативного персонала позволяет принять решения по управляющим воздействиям на оборудование.

Высокий технический уровень оперативного анализа надежности и экономичности энергоблоков позволяет надеяться на достижение поставленной цели. Однако, к сожалению, качество технического обслуживания и восстановления износа установок энергоблока не удовлетворяет предъявляемым требованиям.

В технической литературе неоднократно отмечается повышение влияния «человеческого фактора». А проявляется это влияние в увеличении доли вины персонала, особенно персонала котлотурбинного цеха, в авариях и повреждениях оборудования электростанций, снижении надежности и экономичности их работы. Рекомендуемый подход к дополнительному анализу Т-ЭП предоставляет оперативному персоналу информацию о «слабых звеньях», качестве управления, сохраняемости и ремонте энергоблока и его установок относительно остальных аналогичных энергоблоков электростанций. Ранжирование энергоблоков по надежности и экономичности их работы позволяет учесть опыт работы остальных энергоблоков, сопоставить качество своей работы с работой оперативного персонала других энергоблоков, ориентироваться не только на некоторые расчетные значения Т-ЭП, но и на реально достигнутые успехи оперативного персонала других энергоблоков. Это вносит в процесс организации технического обслуживания и ремонта элементы конкуренции и материального стимулирования улучшения Т-ЭП энергоблока.

Показаны существенные преимущества распределения нагрузки с учетом технического состояния энергоблоков.

Показано, что применение при анализе лишь технико-экономических показателей энергоблоков, приводит к ошибочной ранжировке. Необходимо учитывать техническое состояние и экономичность работы основного оборудования энергоблока.

Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие дать характеристику надежности и экономичности, как каждого энергоблока, так и всех энергоблоков ТЭС. Это позволяет выделить как локальные, так и общестанционные «слабые звенья». Своевременное их устранение составляет основной резерв тепловой экономичности. Показано, что интуитивный характер распределения нагрузки между энергоблоками ведет к перерасходу условного топлива.

Разработан новый метод распределения нагрузки между энергоблоками, учитывающий не только экономичность, но и надежность работы. Эффективность метода проявляется для энергоблоков, у которых расчетный срок службы на исходе или превышает его. В этих условиях энергетические характеристики, снятые при модернизации энергоблоков, уже не соответствует реальным закономерностям. В завершении этой главы приводится алгоритм автоматизированного формирования рекомендаций для повышения надежности и экономичности работы энергоблоков ТЭС.

Рекомендации распределяются между «потребителями» методической поддержки - от Главного инженера ТЭС до машинистов котельной и турбинной установок.

Показано, что повышение эффективности контроля и объективности рекомендаций (методической поддержки персонала) может быть достигнуто более полным учетом особенностей изменения нерабочих состояний энергоблоков рис.14.

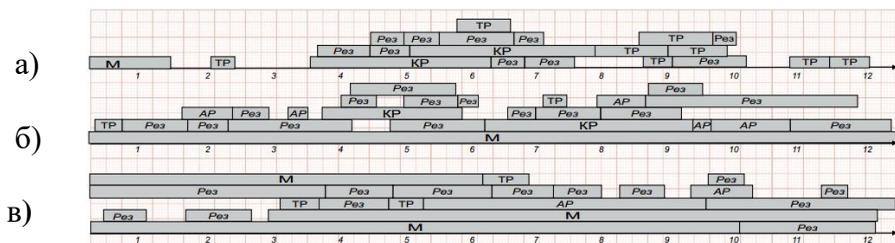


Рисунок 14. Приведена динамика изменения состояний энергоблоков ТЭС в течение года.

Исходными данными для расчетов служат: n_{Σ} - общее число однотипных ЭБ; n_6 - число находящихся в рабочем состоянии ЭБ, $n_6 \leq n_{\Sigma}$; $P_{\min, \text{доп}}$ - минимально допустимая нагрузка ЭБ; $P_{\text{ном}}$ - номинальная мощность ЭБ; V - интегральный показатель надежности и экономичности работы ЭБ; $P_{\text{ср}} = P_{\Sigma} / n_6$ - средняя нагрузка на один ЭБ, где P_{Σ} - нагрузка ТЭС;

Расчет распределения нагрузки между n_6 ЭБ проводится в следующей последовательности:

1. Определяется относительная величина коэффициентов значимости ТС i -го ЭБ по формуле:

$$b_i = \frac{V_i}{V_{\Sigma}}$$

где $i=1, n_6$; $V_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_6^+} V_i^+ = \left| \sum_{j=1}^{n_6^-} V_j^- \right|$; V^+ и V^- - соответственно,

положительные (+) и отрицательные (-) значения V_i ; n_6^+ и n_6^- - соответственно число находящихся в рабочем состоянии ЭБ с V^+ и V^- .

2. Определяются минимальное (b_{\min}) и максимальное (b_{\max}) значение реализаций интегрального показателя b_i по формулам:

$$b_{\min} = \min (b_1, b_2, \dots, b_{n_6})$$

$$b_{\max} = \max (b_1, b_2, \dots, b_{n_6})$$

Очевидно, что $b_{\min} < 0$, а $b_{\max} > 0$;

3. Определяются интервалы возможного снижения (ΔP^-) и повышения (ΔP^+) средней нагрузки ЭБ по формулам:

$$\Delta P^- = P_{\text{ср}} - P_{\min, \text{доп}}$$

$$\Delta P^+ = P_{\text{ном}} - P_{\text{ср}}$$

4. Если $\Delta P^- \leq \Delta P^+$, то расчет распределения нагрузок между n_6 ЭБ с учетом их надежности и экономичности проводится по формуле:

$$P_i = P_{\text{ср}} + \Delta P^- \cdot b_i$$

5. Если же $\Delta P^- > \Delta P^+$, то по формуле:

$$P_i = P_{\text{ср}} + \Delta P^+ \cdot b_i$$

Результаты расчетов распределения нагрузки между ЭБ ТЭС для ряда значений P_{cp} приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Результаты расчетов распределение нагрузки между ЭБ ТЭС для ряда значений P_{cp}

Нагрузк и P_{cp} , МВт	Условные номера энергоблоков							
	1	2	3	4	5	6	7	8
110	115	96,5	103,5	114,9	-	111,3	112,6	116,2
130	140	103	117	139,9	-	132,6	135,2	142,4
150	164,9	109,5	130,5	164,8	-	153,9	157,8	168,6
170	189,9	116	144	189,7	-	175,2	180,4	194,8
190	214,9	122,5	157,5	214,7	-	196,4	203	220,9
210	232,4	149,2	180,8	232,2	-	215,8	221,7	237,9
230	247,4	182,7	207,3	247,3	-	234,5	239,1	251,7
250	262,4	216,2	233,8	262,3	-	253,2	256,5	265,5

Опыт расчетов распределения нагрузок между ЭБ показывает, что существенно большей эффект получается, при использовании уравнения:

$$P_i = P_{cp} - \Delta P^- \frac{b_i}{b_{\min}} = P_{cp} - (P_{cp} - P_{\min, \text{доп}}) \frac{b_i}{b_{\min}}$$

$$P_i = P_{cp} + \Delta P^+ \frac{b_i}{b_{\max}} = P_{cp} + (P_{\text{ном}} - P_{cp}) \frac{b_i}{b_{\text{bin}}}$$

где $i=1, n_b$

Основным этапом при этом является оценка относительных значений интегральных показателей (B), характеризующих надежность и экономичность каждого ЭБ. Исходной информацией для расчета B_i с $i=1, n_{\Sigma}$ служат последние результаты измерения и расчета технико-экономических показателей ЭБ. Разработана специальная программа, подготавливающая эту информацию.

Блок-схема алгоритма определения нагрузки ЭБ с учетом их надежности и экономичности приведена на рис.15.

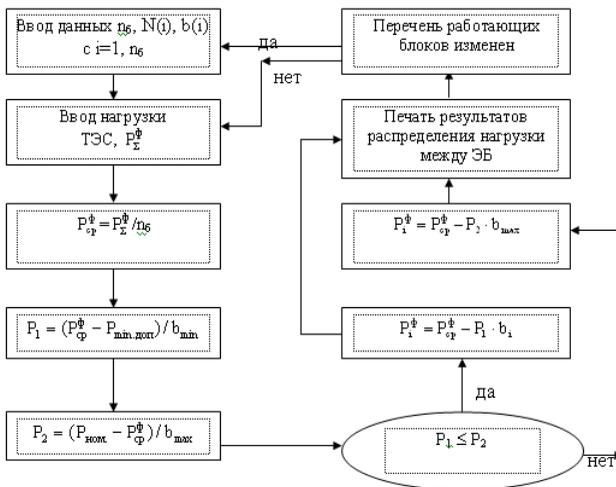


Рисунок 15. Блок-схема алгоритма расчета распределения нагрузки между ЭБ ТЭС

Разработана автоматизированная информационная система, которая формирует рекомендации персоналу по информационной поддержке для повышения надежности и экономичности энергоблоков ТЭС. Данная автоматизированная информационная система снимает все трудности, связанные с определением энергетических характеристик энергетического оборудования.

Все расчеты по распределению нагрузки между энергоблоками ТЭС выполняются в рамках автоматизированной информационной системы анализа и контроля технического состояния энергоблоков. На рис.16 приведена блок схема алгоритма, раскрывающего назначение рекомендуемого анализа технико-экономических показателей энергоблоков ТЭС, а структура рассмотрения и распределения данных анализа ТЭП энергоблоков приведена в рис.17.



Рисунок 16. Блок схема алгоритма анализа ТЭП энергоблоков ТЭС.

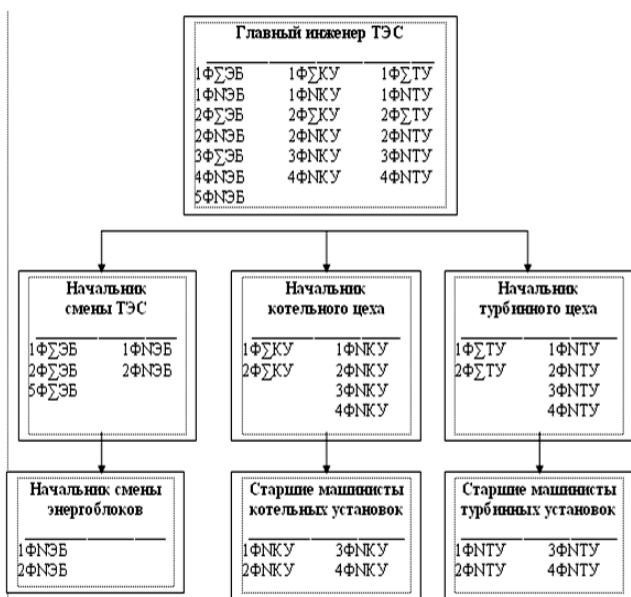


Рисунок 17. Структура рассмотрения и распределения, данных анализа ТЭП энергоблоков и их энергетического оборудования

Автор выражает благодарность научному консультанту, д.т.н., проф. Фархадзаде Э.М. за постоянное внимание к работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Повышение точности расчета эксплуатационных характеристик и показателей надежности оборудования и устройств электроэнергетических систем является непременным условием снижения риска ошибочного решения эксплуатационных задач при организации технического обслуживания и восстановлении износа. Разработанные с этой целью методы, алгоритмы и программы расчёта обеспечивают персонал не только необходимой информационной, но и методической поддержкой в виде рекомендаций.
2. Повышение точности расчета достигнуто, прежде всего, за счет учета многомерного характера статистических данных эксплуатации, разработки новых методов анализа, основанных на имитационном моделировании, математическом аппарате теории проверки статистических гипотез и фидуциальных интервалов.
3. Многомерный характер статистических данных, включающих как сведения о нерабочих состояниях, так и технико-экономические показатели, обуславливает необходимость проведения их классификации по заданным разновидностям признаков. Разработаны методы, алгоритмы и программы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта КУ энергоблоков, позволяющие по результатам измерения и расчета технико-экономических показателей:
 - провести ранжирование КУ по надежности и экономичности работы КУ;
 - выявить «слабые звенья» каждой КУ и совокупности однотипных КУ энергоблоков;
 - оценить результаты оперативного управления режимами работы КУ;

- рассчитать сохраняемость технического состояния КУ при простоях;
 - оценить качество планового ремонта КУ.
4. Разработанные методы, алгоритмы синтеза технико-экономических показателей энергоблоков ТЭС позволяют получить:
- сведения о «слабых звеньях» и рекомендации по основным направлениям повышения надежности и экономичности работы каждого энергоблока и совокупности однотипных энергоблоков;
 - оценку качества управления режимами работы энергоблока оперативным персоналом.
5. Достоверность решения эксплуатационных задач повышается путем привлечения сведений о закономерности изменения технико-экономических показателей во времени. Показано, что зависимость изменения нормированных значений технико-экономических показателей оказывается более информативной, чем зависимость их абсолютных значений.
6. Результаты ранжировки энергоблоков показывают:
- 6.1 Минимальная нагрузка для самого «плохого» энергоблока (энергоблока с максимальным значением интегрального показателя) наблюдается в 77,8% случаев, а максимальная нагрузка для самого «хорошего» энергоблока (энергоблока с минимальным значением интегрального показателя) – в 36% случаев;
- 6.2 Имеют место значительные резервы тепловой экономичности энергоблоков, позволяющие снизить удельный расход условного топлива за счет устранения недостатков технического обслуживания.
7. Показано, что при ранжировке энергоблоков ТЭС интегральные показатели надежности и экономичности работы должны отражать особенности независимых технико-экономических показателей как энергоблока, так и его котельной и турбинной установок.

8. Разработан новый метод распределения нагрузок между энергоблоками ТЭС, учитывающий не только техническое состояние и экономичность каждого энергоблока, но и изменение состава работающих энергоблоков. Экономический эффект распределения нагрузки рекомендуемым методом составляет примерно $0,2 \div 0,3\%$ от расхода топлива. Метод рекомендуется к применению в условиях, когда энергетические характеристики энергоблоков не соответствуют эксплуатационным параметрам.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах

1. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Повышение точности оценки и достоверности сравнения показателей индивидуальной надежности энергоблоков ГРЭС // Москва, Электричество, №9, 2008, с.10-17.
2. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Исмаилова С.М. Метод и алгоритм сравнения показателей надежности объектов электроэнергетических систем // Москва, Электричество, №12, 2008, с.62-67.
3. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А. Метод и алгоритм контроля значимости наблюдаемых закономерностей изменение надежности по ретроспективным данным // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: Сборник докладов III международной научно-практической конференции, Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2008, том 2, с.252-261.
4. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Исмаилова С.М. Метод повышение точности оценки надежности узлов оборудование электроэнергетических систем // Киев «Электронное моделирование», 2009, Том 31, №2, с.81-93.
5. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Назирова У.К. Проверка статистических гипотез при оценивании удельного числа отказов оборудования во времени // Киев, Электронное моделирование, №4, 2009, с.41-55.
6. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А. Метод и алгоритм распознавание функциональных характеристик показателей надежности оборудования ЭЭС // Москва, Электричество, №7, 2009, с.7-13.
7. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. Criterion of the supervision accuracy of indexes reliability of power-

- generating units a state district power station // Journal: «Reliability: Theory&applications», R&RATA (Vol.2 No.), 2009, March., USA, pp. 7-15
8. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Метод и алгоритм сравнение эмпирических характеристик относительной длительности нерабочих состояний оборудования энергосистем // Москва, Электричество, №6, 2010, с.10-15.
 9. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. Control the importance observable laws of change reliability over operation // Journal: «Reliability: Theory&applications». R&RATA, Vol.2 No. 2010, June, USA, pp.20-27
 10. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. Quantitative estimation of individual reliability of the equipment and devices of the power supply system // Journal: «Reliability: Theory&applications», R&RATA (Vol.7 No.4(27)), 2012, December, USA, pp.53-62.
 11. Фархадзаде, Э.М., Мурадалиев, А.З., Фарзалиев, Ю.З. Методические вопросы оценки показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств энергосистемы // Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», - Баку: - 2013. - с.476-484.
 12. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З. Сопоставление методов моделирования непрерывных случайных величин по эмпирическим распределениям // Баку, Проблемы Энергетики, №1, 2013, с.25-31.
 13. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Decrease in risk erroneous classification the multivariate statistical data describing the technical condition of the equipment of power supply systems // Azerbaijan National Academy of Sciences, Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Institute of Physics №1, 2013, pp. 50-57.
 14. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Decrease in risk erroneous classification the multivariate statistical data describing the technical condition of the equipment of power

- supply system // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.8 No.2(29), 2013, March, USA, pp.55-64.
15. Фарзалиев Ю.З. Особенности классификации статистических данных о надежности электрооборудования энергосистем // Баку, Проблемы Энергетики, №3, 2013 с. 29-34.
 16. Фарзалиев Ю.З. Особенности классификации статистических данных о длительности состояний оборудования электроэнергетических систем // Баку, Проблемы Энергетики, №4, 2013, с.36-42.
 17. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Comparison methods of modeling continuous random variables on empirical distributions // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.8 No.2(29)) 2013, June, USA, pp. 49-54.
 18. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Principles of classification statistical data about reliability of the electric equipment of power supply systems // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.8 No.3(30), 2013, September, USA, pp.56-74
 19. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Количественная оценка индивидуальной надежности оборудования и устройств энергосистемы // Киев, Электронное моделирование, № 2, 2013, с.67-80.
 20. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Рафиева Т.К., Исмаилова С.М. Особенности классификации многомерных статистических данных при расчете показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств электроустановок // Аз.НийиПийЭ, «Elmi Əsərlər Toplusu», Баку, 2014, стр. 88-107.
 21. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Comparison parameters average and individual reliability equipment of electro power systems // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.9 No.1(32), 2014, March, USA, pp.73-80
 22. Farhadzadeh E.M., Farzaliyev Y.Z., Muradaliyev A.Z. Method and algorithm of the choice optimum number attributes describing

- reliability of the equipment of electro installations // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.9 No.2(33), 2014, June, USA, pp.21-26.
23. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З. Эффективность критериев целесообразности классификации статистических данных об отказе электрооборудования // Москва, Электричество, №3, 2014, с.19-25.
 24. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Ранжирование энергоблоков электростанций по надежности и экономичности их работы // Баку, Проблемы Энергетики, №2, 2014, с.8-16.
 25. Farzaliyev Y.Z. Comparison of ways of normalization at classification of initial data // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.9 No.2(33), 2014, September, USA, pp.50-56.
 26. Farzaliyev Y.Z. Method and algorithm of ranging of reliability objects of the power supply system // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.10 No.1(36), 2015, March, USA, pp.78-83
 27. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. To the question on distribution of loading between power units TPS // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.10 No.2(37), 2015, June, USA, pp. 42-49.
 28. Fərzəliyev Y.Z. Bloklu elektrik stansiyalarının texniki-iqtisadi göstəricilərinin təhlili üsullarının təkmilləşdirilməsi // Баку, Проблемы Энергетики, №2, 2015, с. 3-9.
 29. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Исмаилова С.М., Абдуллаева С.А. Совершенствование методов анализа технико-экономических показателей блочных электростанций // Международный научный семинар им. Ю.Н.Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Минск, 2015, с.376-382.
 30. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К. Повышение надежности и экономичности котельных установок блочных электростанций // Международный

научный семинар им. Ю.Н.Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Минск, 2015, с.404-410.

31. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Рустамова А.А. Повышение эффективности работы котельных установок ТЭС // Международная научная конференция «Современные научно-технические и прикладные проблемы энергетики», Сумгаит, 2015, с.257-261.
32. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З. Оценка целесообразности классификации многомерных данных по заданному признаку // Киев, Электронное моделирование, №2, 2015, с.77-85.
33. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Особенности расчета показателей индивидуальной надежности оборудования и устройств электроустановок // Киев, Электронное моделирование, Т. 37, №4, 2015, с.85-96.
34. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. О распределении выборки непрерывной случайной величины // Киев, Электронное моделирование, №6, 2015, стр. 69-81
35. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З. Сравнение показателей усредненной и индивидуальной надежности оборудования электроэнергетических систем // Москва, Электричество, №12, 2015, с. 31-37.
36. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. Transition from qualitative to the quantitative approach of formation of decisions on increase of reliability of objects of electro power systems // Journal: «Reliability: Theory&applications», RT&A (Vol.10 No.4(39), 2015, December, USA, pp. 40-52.
37. Fərhadzadə E.M., Muradəliyev A.Z., Fərzəliyev Y.Z. İES-in enerjı blokları arasında yükün paylanması // Баку, Проблемы Энергетики, №3, 2015, с. 12-18.
38. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Классификация объектов энергосистемы по надежности и экономичности их работы // Москва, Энергетик, №8, 2015, с. 27-29.

39. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Оценка качества восстановления износа энергоблоков ТЭС // Минск, Энергетика, №1, 2016, с.14-24.
40. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Автоматизированное формирование рекомендаций для повышения надежности и экономичности энергоблоков ТЭС // Москва, Энергетик, №2, 2016, с.15-17.
41. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А. Совершенствование методов повышения надежности объектов электроэнергетических систем // Москва, Электричество, №8, 2016, с. 18-28.
42. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Оценка точности показателей надежности оборудования электроэнергетических систем по ограниченным статистическим данным // Москва, Электричество, №12, 2016, с. 4-13.
43. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А. Метод повышения точности количественной оценки относительной длительности состояний объектов ЭЭС // Киев, Электронное моделирование, Том 38, №3, 2016, с. 75-85.
44. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Исмаилова С.М. Методы и алгоритмы сравнения и ранжирования надежности и экономичности работы объектов электроэнергетических систем // Москва, Электричество, №8, 2017, с. 4-13.
45. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Достоверность ранжирования объектов ЭЭС // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт, №5-6, 2017, с. 53-62.
46. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. К вопросу о распределении нагрузки между энергоблоками ТЭС // Москва, НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», №7, 2017, с. 3-6.
47. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Рафиева Т.К. Сравнительный анализ методов расчета интегральных

- показателей, характеризующих эффективность работы объектов ЭЭС // Киев, Электронное моделирование, Том 39, №2, 2017, с. 75-89.
48. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Оценка взаимосвязи технико-экономических показателей объектов ЭЭС // Киев, Электронное моделирование, Том 39, №6, 2017, с. 93-105.
49. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Рафиева Т.К., Абдуллаева С.А. Повышение эффективности работы паротурбинных установок энергоблоков ТЭС // Киев, Электронное моделирование, Том 40, №1, 2018, с. 81-92.
50. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Rafiyeva T.K., Abdullayeva S.A. Methods and Algorithms for Selecting Independent Techno-Economic Indicators // [dx.doi.org/10.25729/esr.2018.02.0004](https://doi.org/10.25729/esr.2018.02.0004), Energy Systems Research, Vol. 1, No. 2, 2018, pp. 35-42.
51. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З., Абдуллаева С.А. Автоматизация формирования рекомендаций по повышению эффективности паротурбинных установок энергоблоков 300 МВт ТЭС // Москва, НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», №1, 2019, с. 7-12.

**Статьи, опубликованные в зарубежных изданиях,
включенных в Web of Science, SCOPUS и Zentralblatt MATH**

52. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Метод и алгоритм ранжирования котельных установок блочных электростанций по критерию надёжности и экономичности работы // Москва, Теплоэнергетика, №10, 2015, с.22-29. **(SCOPUS)**.
53. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Rafiyeva T.K., Abdullayeva S.A. Reliability of the estimate of interrelation of parameters efficiently their work of objects of EES // Journal: «Reliability: Theory&applications». RT&A (Vol. 12, No. 2 (45), June, 2017, USA, pp. 21-27. **(SCOPUS)**.

54. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z. Comparison and Ranking of Steam-Turbine Installations of Thermal Power-Stations' Power-Generating Units by Working Efficiency // Москва, Thermal Engineering, Vol. 65, №10, 2018, pp.708-715. **(SCOPUS)**.
55. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Rafiyeva, T.K., Abdullayeva S.A. Minimization of risk of the erroneous decision in the assessment of the importance of statistical relations of technical and economic indicators of the objects of electric power systems // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. And Power Eng. Assoc. V. 61, №3, 2018, pp. 193-206.). **(SCOPUS)**.
56. F.A. Aliyev, N.A. Aliyev, Y.Z. Farzaliyev, and K.K. Gasanov. The Sweep Algorithm for Solving the System of Hyperbolic Partial Differential Equations Describing the Motion in Oil Production // Proceeding of the Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan Volume 44, Number 2, 2018, Pages 295-303. **(WoS, SCOPUS, Zentralblatt MATH.)**.
57. Фархадзаде Э.М. Фарзалиев Ю.З. О Целесообразности классификации многомерных данных // Baku State University, Proceedings of IAM, V.8, N.1, 2019, pp. 76-84. **(Zentralblatt MATH.)**.
58. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Farzaliyev Y.Z., Ashurova U.K. Internal benchmarking of thermal power plants of electric power systems // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. And Power Eng. Assoc. V. 63, №6, 2020, pp. 541-553. **(SCOPUS)**.
59. Farzaliyev Y.Z. Improvement of the methodology evaluating operative efficiency working of electric power systems' thermal power station // The 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications 26-28 August 2020. Baku, Azerbaijan, - pp.125-127. **(WoS)**.
60. Farzaliyev Y.Z., Ashurova, U.K. Analyse integral indices of interrelation of the objects' efficiency working of electric power systems' thermal power station // The 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial

Applications 26-28 August 2020. Baku, Azerbaijan, - pp. 122-124. (WoS).

Личный вклад автора (самостоятельно) и совместно выполненные работы:

- Статьи [14,15,25,27,28,59,60], перечисленные в перечне научных работ по докторской диссертации, написаны автором лично.
- В статьях [1-13,16-24,26,29-58], в соавторстве автор участвовал в обсуждении формулировки научной проблемы, пути и методы ее решения, разработал программное обеспечение и провел численные эксперименты.

Защита диссертации состоится 23 февраля 2024 года в 16⁰⁰ на заседании Диссертационного совета ЕД 2.04, действующего на базе Азербайджанского Технического Университета.

Адрес: AZ 1073 Проспект Г.Джавида 25, Азербайджанский Технический Университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азербайджанского Технического Университета.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Азербайджанского Технического Университета.

Автореферат разослан по соответствующим адресам 22 января 2024 года

Подписано в печать:
Формат бумаги: А5
Объем: 85153
Тираж: 100