На правах рукописи

Виноградова Галина Сергеевна

# МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КОМПОНОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в технике и технологиях)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
**Марков Андрей Валентинович**

Официальные оппоненты: **Жарковский Александр Аркадьевич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Петра Великого», кафедра турбин, гидромашин и авиационных двигателей, профессор кафедры

**Максимов Александр Викторович**,
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», кафедра прикладной математики и информационных технологий, преподаватель

Ведущая организация: Акционерное Общество «Конструкторское бюро специального машиностроения» (АО «КБСМ»), Санкт-Петербург

Защита состоится 18 апреля 2018 года в 14.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.121.03, созданного при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 16 марта 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 999.121.03,
канд. техн. наук А.Г. Владыко

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Доля электроэнергии, вырабатываемой атомными электрическими станциями (АЭС) ежегодно растет, заключаются контракты на строительство энергоблоков АЭС как в России, так и за рубежом. Государственной корпорацией по атомной энергии (ГК «Росатом») разработаны «дорожные карты», стратегическими целями которых является сооружение 16 энергоблоков в России (до 2020 г.) и 38 энергоблоков в других странах (до 2030 г.). Высокая конкуренция на мировом рынке в области проектирования и сооружения блоков АЭС задает жесткие требования к качеству продукта – проекта блока АЭС. В целях повышения конкурентоспособности российского проекта станции, разработчики стремятся снизить сроки ввода в эксплуатацию каждого нового блока АЭС, но при сокращении срока ввода проекта качество, надежность и безопасность российских проектов АЭС должны быть на заданном уровне. Требования по безопасности и качеству проекта АЭС регулируют на национальном уровне (Ростехнадзор РФ) и на международном уровне (МАГАТЭ, STUK, ASME и другие международные организации). На сокращение ввода АЭС в эксплуатацию влияет множество факторов: выбор и утверждение проекта станции и конструкции применяемого оборудования и, в том числе, конструкции главного циркуляционного насоса, далее – насосного оборудования (НО).

Новые международные и национальные требования к качеству процесса конструкторское проектирование насосного оборудования с одной стороны и недостатки подхода к управлению качеством процесса конструкторское проектирование насосного оборудования, заключающиеся в отсутствии квалиметрической модели для оценки результата процесса с другой стороны, обосновывают актуальность разработки квалиметрической модели и методики выбора оптимальной компоновки насосного оборудования.

Работа выполнена в рамках «Дорожной карты до 2020» ГК «Росатом». Реализация предложенной методики способствует выполнению программы развития атомной промышленности России (паспорт программы Инновационного развития и технической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2020 года в гражданской части), являющейся важным звеном реализации проектов Комиссии при президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России (создана указом президента РФ от 20.05.2009 № 579).

**Степень разработанности темы.** Проблема выбора оптимальной конструкции оборудования на начальном этапе конструкторского проектирования – это проблема принятия решения. Проблема принятия решения рассматривается в трудах ИСА РАН, СПИИРАН, работах отечественных и зарубежных ученых и исследователей: Г. Саймона, Т. Саати, Р. Акоффа, С. Янга, Х. Райфа, Э. Мушика, П. Мюллера, О.И. Ларичева, Е.П. Голубкова, А.Г. Венделина, Ю.Ю. Екатеринославского, Ю.Ф. Мартемьянова, Т.Я. Лазаревой, С.Я. Егорова, А.В. Белова и других ученых. Анализ этих работ позволяет сделать вывод, что предложенные методики необходимо адаптировать к специфическому процессу конструкторское проектирование НО для АЭС. Проблема выбора

компоновочного решения НО в отрасли атомной энергетики исследована мало, можно отметить работу Э.Г Новинского «Исследования по созданию главных циркуляционных насосов для АЭС и ЯЭУ». В этой работе рассматриваются конструкторские решения на этапе отработки уже выбранной компоновки насосного оборудования для циркуляции натриевого теплоносителя. В работе Э.Г. Новинского дается прогноз применения выработанных конструкторских решений новых НО для циркуляции водяного теплоносителя, вопрос выбора компоновочного решения НО не рассматривается с точки зрения выполнения новых требований МАГАТЭ и ИСО: верификация проекта и управление рисками при проектировании и разработке.

**Цель и задачи исследования**. Целью диссертационного исследования является улучшение процесса конструкторское проектирование насосного оборудования для АЭС путем создания квалиметрической модели оценки компоновочного решения и методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования. Для достижения поставленной цели диссертационного исследования необходимо было решить следующие задачи:

– проанализировать этапы процесса конструкторское проектирование насосного оборудования и определить этап, требующий улучшения;

– уточнить перечень показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования;

– адаптировать современные квалиметрические инструменты для решения задачи выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования;

– разработать алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков, возникающих при подготовке проектной документации;

– разработать программное обеспечение, реализующее алгоритм оптимального выбора компоновочного решения насосного оборудования;

– разработать стандарт организации «Верификация проекта оборудования», реализующий методику выбора оптимального компоновочного решения.

**Объект исследования** – характеристики насосного оборудования для АЭС.

**Предмет исследования** – теоретические и методические вопросы выбора оптимального проекта компоновочного решения насосного оборудования.

**Научная** (научно-техническая) **задача** – разработка методики, позволяющей снизить риск утверждения неоптимального компоновочного решения насосного оборудования.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– в результате системного анализа процесса конструкторское проектирование, уточнен стандартизированный состав основных показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, стандартизированная группа «показателей назначения» дополнена показателем «коэффициент быстроходности», позволяющим проводить сравнительную оценку различных типов центробежных насосов;

– впервые разработана квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования с применением адаптированного квалиметрического инструмента качества – функции желательности Харрингтона, позволяющей более точно устанавливать соответствие между натуральными значениями показателей в физических шкалах и психофизическими параметрами (субъективными оценками «ценности» этих значений);

– разработан новый алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков по критерию Сэвиджа, позволяющий сделать выбор, который приведет к наименее тяжелым последствиям, если выбор окажется ошибочным.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость научных положений, изложенных в работе состоит в следующем:

– расширена стандартизированная группа «показателей назначения», характеризующих насосное оборудование;

– разработана квалиметрическая модель оценки компоновочного решения насосного оборудования;

– разработан алгоритм оценки рисков на начальном этапе технического проектирования.

Практическая значимость работы состоит во внедрении и использовании основных положений, выводов и рекомендаций, полученных при исследовании процесса конструкторское проектирование насосного оборудования. Практическую значимость работы представляют:

– реализация предложенного алгоритма выбора оптимального компоновочного решения в программном обеспечении;

– верифицированный алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, который может быть применен при конструировании ремонтируемой продукции в отрасли машиностроения;

– разработаны рекомендации по применению методики при решении задач выбора оптимального компоновочного решения ремонтируемой продукции.

**Методология и методы исследования.** Поставленная цель достигнута путем проведения теоретических и практических исследований. В работе применены методы: теории анализа процессов; теории математического моделирования; математические методы поддержки принятия решений; современные инструменты квалиметрической оценки качества.

**Положения, выносимые на защиту:**

– уточненный состав показателей качества, характеризующих компоновочное решение насосного оборудования;

– квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования с применением функции желательности Харрингтона;

– алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков при подготовке проектной документации по критерию Сэвиджа;

– результаты практических исследований в условиях реального производства предлагаемой методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность и обоснованность научных положений и результатов работы обусловлены: применением общепринятого математического аппарата теории принятия решений; выбором показателей качества с использованием нормативно-технических документов; применением статистических данных из официальных источников; публикацией и обсуждением основных результатов диссертационного исследования. Основные теоретические результаты подтверждены актами внедрения результатов диссертационной работы в реальное производство и учебный процесс БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

**Тематика и содержание диссертации** соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 05.13.01: п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 13. «Методы получения, анализа и обработки экспертной информации».

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: международной научно-практической конференции «Шаг в будущее: научный и практический опыт развития, научные гипотезы, новизна и апробация результатов исследований…» (Санкт-Петербург, 2015); VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасти «Команда 2015» (Санкт-Петербург, 2015); международной научно-практической конференции «Инновации в формировании стратегического вектора развития фундаментальных и прикладных научных исследований» (Санкт-Петербург, 2015); XXI всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск, 2015); XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Иваново, 2016); VIII Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» БГТУ «ВОЕНМЕХ» (Санкт-Петербург, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК, 6 – в сборниках научных статей, трудов и материалах конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты получены автором самостоятельно в рамках, проведенных им теоретических и практических исследований.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений.

Содержание работы изложено на 176 листах машинописного текста, включая 35 рисунков и 29 таблиц. Список литературы включает 121 библиографический источник.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы, определена цель и задачи диссертационного исследования. Определены положения, выносимые на защиту. Перечислены полученные научные результаты диссертационного исследования, показана их теоретическая и практическая значимость. Приведены результаты апробации.

**Первая глава** содержит анализ проблемы улучшения процесса конструкторское проектирование насосного оборудования для АЭС. В главе рассмотрены общие требования, предъявляемые к НО для АЭС. Проведен системный анализ процесса конструкторское проектирование с применением IDEF0-методологии. Установлены причинно-следственные связи требований, изложенных в технической спецификации (ТС) заказчика и показателей качества, характеризующих НО, необходимых для синтеза технического задания (ТЗ). Определена операция процесса, требующая улучшение – «выбор компоновки». Выбор компоновки определяет весь проект, это основа ТЗ. Составление ТЗ – сложная и ответственная задача: многие данные ещё не известны, но то, как задание будет составлено, способно облегчить или затруднить последующее проектирование оборудования. Проведен анализ требований стандартов по управлению деловой деятельностью и управлению рисками в области качества и общего менеджмента такими как ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и ИСО 31000-2010 применительно к процессу «проектирование и разработка». Рассмотрены специальные стандарты отрасли, определяющие обязательные требования к управлению качеством процесса «проектирование и разработка» атомных установок: GSR Part 2, YVL E.9 и ASME NC-3400. Проведен обзор методик оценки и выбора оптимального компоновочного решения известных учёных: С.Я. Егорова, А.В. Белова, Э.Г. Новинского и других. Рассмотрен традиционный подход осуществления оптимального выбора компоновки НО для АЭС. Традиционный подход заключается в применении метода «попарного сравнения». Очевидно, что эффективность и достоверность результата такого метода снижается при увеличении числа сравниваемых вариантов компоновок НО. Определены недостатки рассмотренных известных методик с точки зрения выполнения требований новых нормативных документов по управлению качеством процесса «проектирование и разработка» насосного оборудования для АЭС.

**Выводы по первой главе.** В результате анализа процесса «конструкторское проектирование» НО для АЭС подтверждена важность проведения верификации проекта и оценки рисков, связанных с процессом. На основе проведенного анализа работ отечественных и зарубежных ученых и нормативных документов, определяющих требования к процессу проектирование сделаны следующие выводы:

– установлена необходимость проведения оценки оптимальности выбора компоновочного решения для дальнейшей проработки ТЗ;

– установлено, что конструкторская организация должна разработать методику верификации проекта и оценки рисков при проектировании в соответствии с требованиями новых международных стандартов по управлению деятельностью;

– выявлено отсутствие методики верификации на начальном этапе технического проектирования с учетом требований новых международных нормативных документов по управлению качеством при проектировании.

Для решения поставленной задачи исследования автор предлагает разработать методику выбора оптимального компоновочного решения на начальном этапе технического проектирования НО с оценкой рисков и реализовать методику в программном обеспечении.

**Во второй главе** с целью решения задачи выбора оптимального компоновочного решения НО для АЭС рассмотрены и адаптированы современные инструменты оценки качества и системного анализа: методика проведения экспертной оценки, метод расчета определяющего показателя качества, функция желательности Харрингтона, критерий Сэвиджа.

Операция «выбрать компоновку» начального этапа технического проектирования является одним из способов осуществления верификации проекта. Верификация проекта может включать: осуществление альтернативных расчетов; сравнение и оценка технической документации по новому проекту с аналогичной документацией по апробированному проекту; проведение испытаний и демонстраций; анализ документов до их выпуска. Верификация проекта оборудования в соответствии GSR Part 2 и ГОСТ Р ИСО 9001-2015 является элементом систем менеджмента качества организации, для выполнения такой оценки необходимо разработать методику оценки и определить критерии. Задача выбора оптимальной компоновки рассматривается на начальном этапе технического проектирования, зачастую при отсутствии достаточного количества статистических данных. Это неформальная задача и решается она с применением метода экспертных оценок. Существуют различные методы обработки экспертных оценок. Их анализ показал, что для достижения цели исследования оптимальным по точности, трудоемкости и временны́м затратам является метод средневзвешенных экспертных оценок. На основе этого метода разработана методика выбора оптимального компоновочного решения НО для АЭС.

Математическую задачу цели диссертационного исследования можно определить следующим образом – оптимальное компоновочное решение НО, соответствующее заданным в ТС критериям, можно оценить по значениям определенного набора показателей качества. Требуется определить вектор конструктивных параметров НО $Y$, представляемый в виде целевой функции $F(X;\ Q)$, связывающей параметры и характеристики насосного оборудования (показатели качества) $X$ на множестве ограничений $Q$ (ограниченный по габаритным параметрам, требованиям по надежности, безопасности и др. требованиям согласно ТС, ГОСТ 4.118, ГОСТ 24656-81), выражение (1):

$$Y = F(X,\ Q), \tag{1}$$

где $X = X(K_{сумм_опр}, R_{max})$ – вектор конструктивных параметров насосного оборудования, представление; $K_{сумм_опр}$ – определяющий показатель качества конструкции по техническим параметрам, это комплексный показатель качества, его величина определяется как свертка показателей качества характеризующих НО. Определяющий показатель качества, это комплексный показатель качества, по которому принимается решение оценивать качество компоновки НО; $R_{max}$ – максимальный риск выбора неоптимального компоновочного решения насосного оборудования на начальном этапе проектирования, по критерию Сэвиджа.

Параметры $Q$ задаются генеральным проектировщиком и являются неизменяемыми ограничениями, вектор параметров ограничения.

Тогда далее по умолчанию будем считать, что $Y = F(X)$, и рассматривать детерминированную модель выбора оптимальной компоновки НО для АЭС, выражение (2):

$$Y_{опт} = F((\max K_{сумм_опр}); (\min R_{max})). \quad (2)$$

За результат решения задачи $Y_{опт}$ принимается утверждение компоновки оборудования с максимальным значением определяющего показателя качества $K_{сумм_опр}$ и минимальным значением критерия риска $R_{max}$.

Минимальное значение критерия риска является критерием оптимального выбора компоновки.

При решении задачи выбора оптимального компоновочного решения НО, соответствующего требованиям ТС, возможны два варианта: построение компоновочной схемы непосредственно по полученным исходным данным (т.е. синтез новой конструкции) или сравнение аналогов из базы предыдущих проектов с требованиями ТС и выбор наиболее соответствующего предыдущего проекта.

Блок-схема алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС приведена на рисунке 1. Таким образом, для реализации предложенных решений задачи оценки и выбора оптимального компоновочного решения предлагается использовать следующий алгоритм, состоящий из трех частей. При получении технической спецификации от заказчика конструктор производит выбор оптимального компоновочного решения оборудования, для этого:

1.1. определяется возможность синтеза новых компоновок;

1.2. с помощью специально разработанного программного обеспечения из массива компоновочных решений предыдущих проектов методом прямого выбора конструктор выбирает компоновку или массив компоновок, согласно основным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС.

1.2.1. Если из базы проектов с применением программного обеспечения подобрано одно компоновочное решение, соответствующее заданным в ТС параметрам, оно сравнивается экспертным методом с применением функции желательности Харрингтона с синтезированным компоновочным решением (при его наличии). Производится расчет определяющего показателя качества и критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

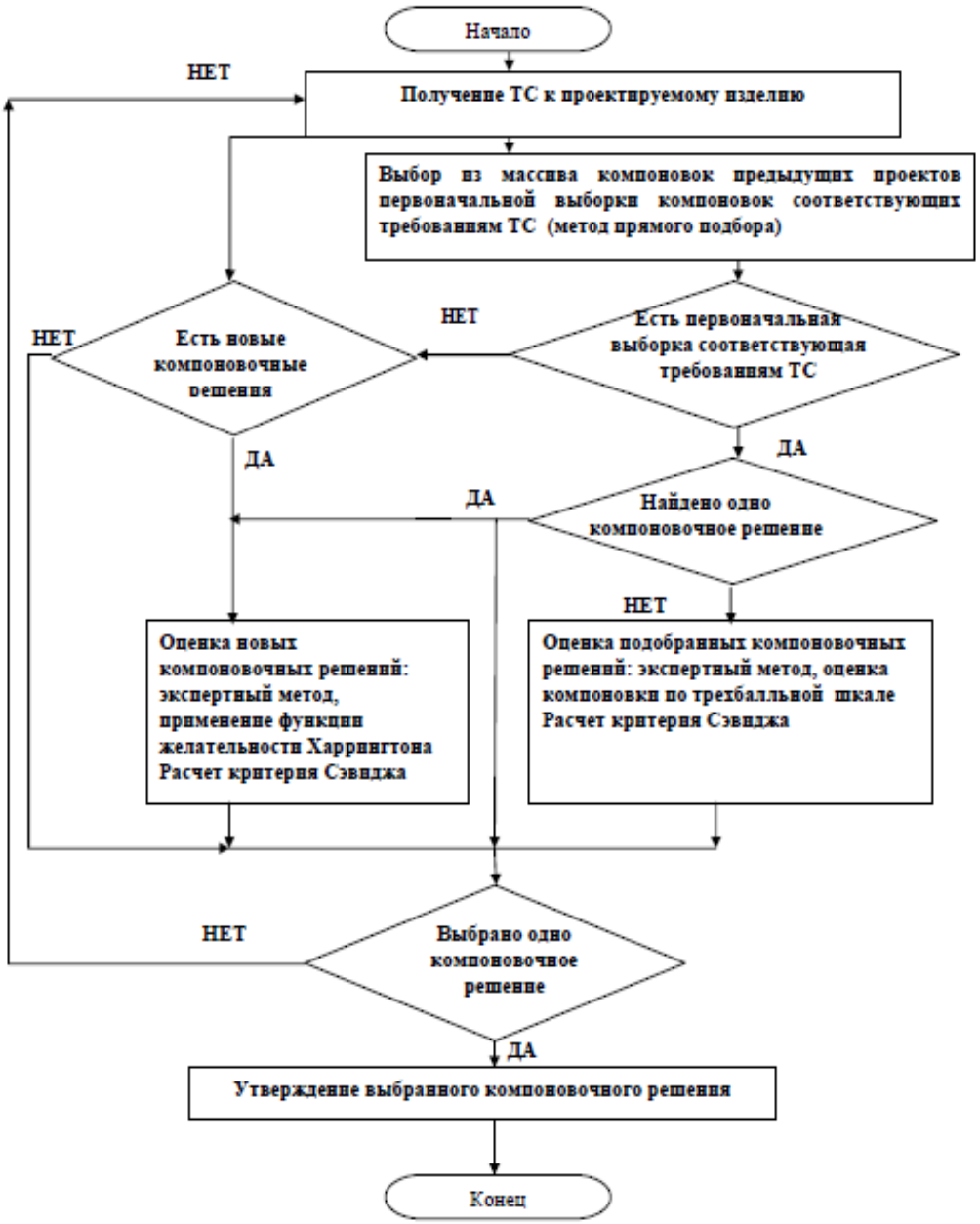


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма выбора компоновочного решения насосного оборудования

1.2.2. Если из базы проектов с применением программного обеспечения подобрано несколько компоновочных решений предыдущих проектов, удовлетворяющих заданным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС, проводится расчет определяющего показателя качества. Оценка проводится экспертным методом по трехбалльной шкале. Компоновка, подобранная из базы предыдущих проектов, с максимальным значением определяющего показателя качества сравнивается с синтезированным компоновочным решением (при его наличии) с применением функции желательности Харрингтона. Производится расчет критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

1.2.3. Если из базы проектов с применением программного обеспечения не подобрано компоновочное решение, соответствующее заданным эксплуатационно-

технологическим параметрам ТС, по возможности синтезируются новые компоновочные решения. Проводится оценка новых компоновок по основным эксплуатационно-технологическим параметрам с применением функции желательности Харрингтона, проводится расчет определяющего показателя качества и критерия Сэвиджа. Оптимальное компоновочное решение утверждается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

При отсутствии компоновочных решений из базы проектов и при отсутствии синтезированных компоновочных решений, соответствующих эксплуатационно-технологическим параметрам, заданным ТС, конструктор обращается к разработчику ТС за корректировкой параметров к проектируемому оборудованию.

Решая рассмотренные задачи можно с большой степенью достоверности выбрать оптимальный вариант компоновки насосного оборудования для АЭС, который будет утвержден для дальнейшей конструкторской проработки, выпуска и утверждения ТЗ. На следующих этапах технического проектирования происходит более подробная «увязка» выбранной компоновки по геометрическим и техническим параметрам.

### *Этапы алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования*

#### *Этап 1. Расчет определяющего показателя качества компоновочного решения*

Алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС основан на методе экспертных оценок, для реализации этого метода проводится расчет весовых коэффициентов показателей качества, оценка согласованности мнений экспертной группы и экспертная оценка рассматриваемой компоновки НО. В общем виде определяющий показатель качества компоновочного решения НО ($K_{опр}$) рассчитывается по принципу среднего взвешенного, включает набор показателей качества *($K_j$)*, который можно представить по выражению (3):

$$K^{\Omega} = \sqrt[\nu]{\frac{\sum_{j=1}^{n} \alpha_j K_j}{\sum_{j=1}^{n} \alpha_j}}, \qquad (3)$$

где ν – параметр логики усреднения; $\alpha_j$ – весовой коэффициент по *j*-му показателю качества; $K_j$ – значение *j*-го показателя качества, *n* – число показателей качества $K_j$.

Для выполнения экспертной оценки проекта компоновки НО для АЭС на начальном этапе технического проектирования определены группы показателей качества, характеризующие проект компоновки: показатели назначения; показатели технологической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающей среды; эстетические и эргономические показатели; требования к транспортированию и хранению.

*Расчет весовых коэффициентов.* Экспертная оценка проводится группой экспертов от 3 до 15 членов, по опросным листам. В опросных листах определен специальный набор показателей качества характеризующих НО на начальном этапе

технического проектирования. Показатели качества неравнозначно важны для утверждения оптимальной компоновки, поэтому проводится расчет весовых коэффициентов $\alpha_j$. Эксперты проводят ранжирование показателей качества. Оценку степени значимости показателей качества (технических характеристик) насосного оборудования эксперты производят путем присвоения им рангового номера. Ранг 1 присваивается показателю качества с наивысшей оценкой данной экспертом. Ранг $n$ присваивается показателю качества с наименьшей оценкой данной экспертом.

Одинаковый ранговый номер присваивается показателям качества равнозначным с точки зрения эксперта. Составляется сводная таблица рангов показателей качества по результатам данных анкетного опроса экспертной группы. Подсчитываются суммы рангов $S_{Aj}$ по столбцам таблицы по выражению (4):

$$S_{Aj} = \sum_{i=1}^{m} A_{ij}, \tag{4}$$

где $j$ – номер показателя качества; $i$ – условный номер эксперта; $A_{ij}$ – ранг $j$-го показателя качества, присвоенный $i$-м экспертом; $m$ – число опрошенных экспертов; $n$ – число показателей качества.

Ранг $A_{ij}$ – является показателем степени влияния (весомости) $j$-го показателя качества для оцениваемой компоновки НО. Обработка результатов опроса позволяет провести первичную обобщенную ранжировку показателей качества. Первичный ранг $R_{j(1)} = 1$ получает показатель качества $j$ с наименьшей суммой рангов $S_{Aj}$.

При ранжировании показателей качества могут появляться связанные ранги (одинаковый ранговый номер). В этом случае проводят переформирование рангов. Переформирование рангов производится без изменения мнения эксперта, то есть между ранговыми номерами должны сохраниться соответствующие соотношения (больше, меньше или равно). Также ранг не может быть выше 1 и ниже значения равного количеству показателей качества $n$. Если показатели качества $K_i$, $K_{i+1}$, $K_{i+2}$ имеют одинаковые ранги и разделяют соответственно места: ($i$), ($i$ + 1) и ($i$ + 2), то их переформированный ранг будет равен, выражение (5):

$$A_{ij} = i + (\sum_{q=1}^{t} q)/t, \tag{5}$$

где $i$ – порядковый номер по весомости первого из группы показателей, имеющих одинаковые ранги $A_{ij}$; $t$ – количество показателей с одинаковыми рангами; $q$ – индекс увеличения места ранга.

После переформирования рангов по каждому эксперту их сумма по строке должна быть равна, выражение (6):

$$\sum_{j=1}^{n} A_{ij} = \sum_{j=1}^{n} j. \tag{6}$$

Точно так же, как и при первичной обработке результатов опроса, определяются $S_{Aj}$ – суммы рангов по столбцам (4) и $R_{j(2)}$ – вторичные ранги. Значение весового коэффициента $\alpha_j$ определяется выражением (7):

$$\alpha_j = \frac{\beta_j}{\sum_{j=1}^{n} \beta_j}, \text{ где } \beta_j = \frac{1}{S_{Aj}}, \text{ важно, что } \sum_{j=1}^{n} \alpha_j = 1. \tag{7}$$

*Оценка согласованности мнений экспертной группы.* При проведении экспертных оценок очень важно снизить субъективную составляющую оценки и сформировать

компетентную экспертную группу. Для этого проводится количественная оценка согласованности мнений экспертов экспертной группы по критерию Кендалла (коэффициент конкордации), выражение (8):

$$W = \frac{\left(12 * \sum_{j=1}^{n} D_j^2\right)}{m^2 * (n^3 - n) - m * \sum_{i=1}^{m} T_i}, \quad (8)$$

где $D_j$ – отклонение суммы рангов $S_{Aj}$ для $j$-го показателя качества от общей средней суммы рангов $S_A$; $m$ – число опрошенных экспертов; $n$ – количество оцениваемых показателей качества.

$$D_j = \left|S_{Aj} - S_A\right|, \text{ где } S_A = \left(\sum_{j=1}^{n} S_{Aj}\right)/n, \quad (9)$$

где $T_i$ – параметр связи рангов в мнениях $i$-го эксперта.

$$T_i = \sum_{l=1}^{L_i} (t_l^3 - t_l), \quad (10)$$

где $L_i$ – число связок (видов повторяющихся элементов) в оценках $i$-го эксперта, $t_l$ – количество элементов в $l$-й связке для $i$-го эксперта (количество повторяющихся элементов).

Коэффициент $W$ принимает значения от 0 (мнения экспертов не согласованы) до 1 (полное согласие мнений экспертов). Статистическую значимость коэффициента $W$ оценивают при помощи критерия Пирсона $\chi_{\text{P}}^2$, при n ≥ 7, выражение (11):

$$\chi_{\text{P}}^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W. \quad (11)$$

Предположение о наличии согласия между экспертами принимается, если $\chi_{\text{P}}^2 > \chi_{\text{T}}^2$, $\chi_{\text{T}}^2$ определяется по таблице Критерия $\chi_{\text{T}}^2$ для принятой доверительной вероятности $P$ или заданном уровне значимости α и числе степеней свободы $f = n - 1$. Если $\chi_{\text{P}}^2 < \chi_{\text{T}}^2$, то необходимо провести повторное анкетирование, так как либо квалификация экспертов недостаточна, либо высока сложность оцениваемого объекта. Важно, что уровень значимости α для оценок результатов в атомной энергетике установлен не ниже 0,05.

*Оценка компоновочного решения при наличии подходящих компоновочных решений из базы данных проектов.* Проводится оценка компоновок из базы данных проектов, на соответствие требованиям ТС. Применяется экспертный метод, оценки выставляются по трехбалльной шкале*:* 4 балла — компоновка превышает требования ТС по $n$-му показателю качества, 2 балла – компоновка соответствует требованиям ТС $n$-му показателю качества, 0 балла – компоновка, не соответствующий требованиям ТС $n$-му показателю качества. Квалиметрическая модель определяющего показателя качества проекта компоновки НО представлена в виде свертки комплексных и единичных показателей качества, указанных в таблице 1. Свертка показателей групп 1–3, 6, 7 рассчитывается как среднее арифметическое взвешенное, показателей группа 4, 5 как среднее геометрическое взвешенное, тогда определяющий показатель качества рассчитывается по формуле (12) смешанного среднего. Сравнение множества вариантов компоновки ($k$) производится фиксированным числом экспертов ($m$) по фиксированному количеству показателей качества ($n$). Оценки выставляются в разработанных опросных листах.

Таблица 1 – Квалиметрическая модель оценки проекта НО из базы проектов

| *Наименование группы показателей качества продукции* | *Единичные и комплексные показатели качества – параметры и характеристики сравнения* | *Свертка показателя* |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Показатели назначения | 1.1. Подача | $K_1 = \sum_{j=1}^{4} \alpha_1 \cdot K_j \Big/ \sum_{j=1}^{4} \alpha_1$ |
| | 1.2 Напор | |
| | 1.3 Частота вращения | |
| | 1.4 Коэффициент быстроходности | |
| 2. Показатели технологической и энергетической эффективности | 2.1 КПД | $K_2 = \sum_{j=1}^{2} \alpha_2 \cdot K_j \Big/ \sum_{j=1}^{2} \alpha_2$ |
| | 2.2 Кавитационный запас | |
| 3. Конструктивные и технологические показатели | 3.1 Весовое совершенство | $K_3 = \sum_{j=1}^{2} \alpha_3 \cdot K_j \Big/ \sum_{j=1}^{2} \alpha_3$ |
| | 3.2 Соответствие геометрии маш.зала (компоновка боксов и расположение вспомогательных систем) | |
| 4. Показатели надежности | 4.1 Коэффициент готовности | $K_4 = \sqrt[\sum_{j=1}^{6} \alpha_4]{\prod_{j=1}^{6} K_j^{\alpha_4}}$ |
| | 4.2.Ремонтопригодность | |
| | 4.3. Сохранность в упаковке | |
| | 4.4 Средний ресурс между средними ремонтами | |
| | 4.5 Средняя наработка на отказ | |
| | 4.6 Назначенный срок службы | |
| 5. Требования к безопасности и охране окружающей среды | 5.1 Механическая безопасность | $K_5 = \sqrt[\sum_{j=1}^{4} \alpha_5]{\prod_{i=1}^{4} K_j^{\alpha_5}}$ |
| | 5.2 Электрическая безопасность | |
| | 5.3. Термическая безопасность | |
| | 5.4 Внешняя утечка (организационная протечка воды) | |
| 6. Эстетические и эргономические показатели | 6.1 Вибрация | $K_6 = \sum_{j=1}^{5} \alpha_6 \cdot K_j \Big/ \sum_{j=1}^{5} \alpha_6$ |
| | 6.2 Шум | |
| | 6.3. Внешняя доступность для ремонта электродвигателя | |
| | 6.4. Расположение регулировочных и соединительных элементов | |
| | 6.5.Потребность в высококвалифицированном обслуживающем персонале (шефмонтаж, авторский надзор) | |
| 7. Требования к транспортированию и хранению | 7.1 Расположение элементов раскрепления | $K_7 = \sum_{j=1}^{2} \alpha_7 \cdot K_j \Big/ \sum_{j=1}^{2} \alpha_7$ |
| | 7.2 Сохранность без упаковки | |
| Определяющий показатель качества оценки проекта компоновки ($K_{\text{сумм}k}$) | $\overline{\overline{K}} = (K_1 + K_2 + K_3 + K_6 + K_7)/5 + \sqrt[2]{K_4 \cdot K_5}$ (12) | |

Суммарный определяющий показатель качества $K_{\text{сумм_опр}}$ для $k$-го компоновочного решения насосного оборудования, подобранного из базы компоновочных решений, рассчитывается по выражению (13):

$$K_{\text{сумм_опр}k} = \frac{\sum_{i=1}^{m} K_{\text{сумм}k}}{m}. \quad (13)$$

*Оценка синтезированного компоновочного решения и компоновочных решений из базы проектов.* Если есть синтезированные компоновочные решения и решения из

базы данных предыдущих проектов насосного оборудования, удовлетворяющие требованиям ТС, сравнение компоновок проводится также экспертным методом с расчетом определяющего показателя качества. Оценка проводится по показателям качества и группам показателей качества, приведённым в таблице 1. Оценки выставляются по шкале желательности Харрингтона, рисунок 2, где $d_j$ – оценка по $j$-му показателю для $k$-й компоновки, определяется согласно функции желательности Харрингтона:

- $d_j \in [0;0,2]$ – очень плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,2;0,37]$ – плохие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,37;0,63]$ – удовлетворительные данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,63;0,8]$ – хорошие данные по оцениваемому показателю качества;
- $d_j \in (0,8;1,0]$ – отличные данные по оцениваемому показателю качества.

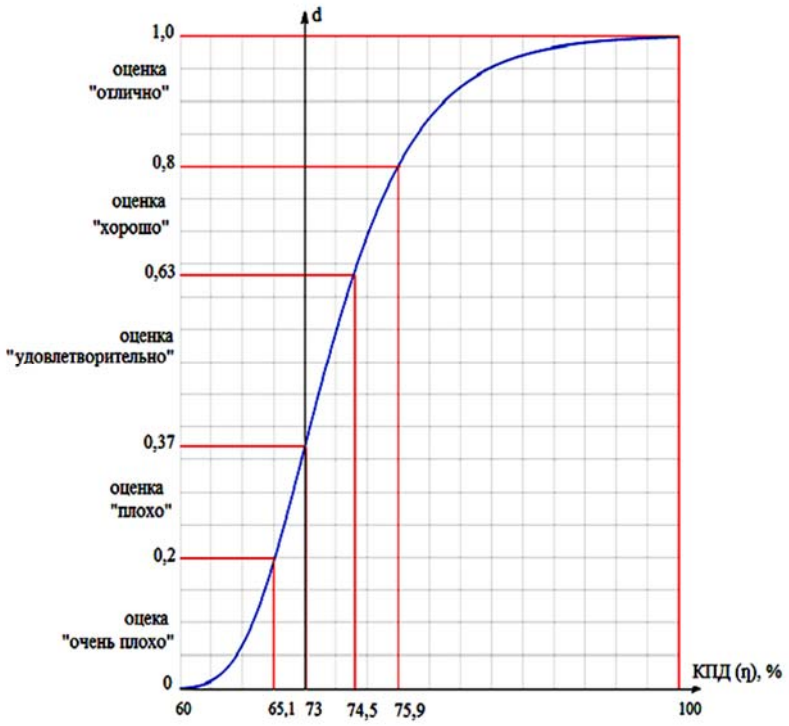


Рисунок 2 – График желательности Харрингтона для оценки критерия КПД

Определяющий показатель качества каждого оцениваемого проекта компоновки НО $K_{\text{сумм}k}$, рассчитывается по дополненной автором формуле Харрингтона, как среднее геометрическое взвешенное, выражение (14):

$$K_{\text{сумм}k} = D = \sqrt[\sum_{j=1}^{n} \alpha_j]{\prod_{j=1}^{n} d_j^{\alpha_j}}. \quad (14)$$

Суммарный определяющий показатель качества $K_{\text{сумм_опр}}$ для $k$-го компоновочного решения рассчитывается по выражению (13).

*Этап 2. Оценка рисков по критерию Сэвиджа*

Вопрос выбора оптимального компоновочного решения НО для АЭС на начальном этапе технического проектирования это вопрос принятия решения в условиях неопределенности. Решение таких задач рассматривается в теории «игр с природой». Задача лица, принимающего решение, выбрать оптимальную конструкцию с минимальными рисками. В данной работе применен критерий Сэвиджа принятия решения. Сущность этого критерия заключается в минимизации риска, критерий позволяет оценить максимальную потерю выигрыша по сравнению с тем, что можно было бы получить в данных условиях. В таблице 2 приведен пример матрицы рисков при сравнении четырех компоновочных решений НО для АЭС подобранных из базы проектов.

Таблица 2 – Матрица рисков выбора компоновочного решения НО из базы проектов

| *A (альтернативы / варианты компоновок НО)* | *R (риски) по показателям качества* | | | | | | | $R_{max}$ *(максимальный риск)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *6* | *7* | |
| *A*1 (1714) | 0,000 | 0,000 | 0,185 | 0,019 | 0,024 | 0,034 | 0,046 | 0,185 |
| *A*2 (1716) | 0,000 | 0,000 | 0,027 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,031 | 0,031 |
| *A*3 (1716-01) | 0,000 | 0,197 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 0,051 | 0,000 | 0,197 |
| *A*4 (1716-02) | 0,000 | 0,197 | 0,053 | 0,010 | 0,018 | 0,056 | 0,031 | 0,197 |

Компоновка из базы данных с минимальным значением $R_{max}$, утверждается для дальнейшей конструкторской проработки и выпуска ТЗ. Управление риском производится путем принятия в дальнейшую разработку компоновочного решения с минимальным значением критерия риска – критерия Сэвиджа.

**Выводы по второй главе.** Для достижения поставленной цели диссертационного исследования разработан алгоритм проведения экспертной оценки с расчетом средневзвешенного определяющего показателя качества, оценка рисков проводится по критерию Сэвиджа. Согласованность мнений экспертов оценивается коэффициентом Кендалла. Предложенный алгоритм позволяет выбрать оптимальное компоновочное решение НО для АЭС в заданных ТС ограничениях, с минимальным значением критерия риска.

**В третьей главе** приведен алгоритм работы разработанного с участием автора программного обеспечения «Программа по выбору компоновочного решения при проектировании технических систем», далее «ОцКом».

Программное обеспечение: позволяет автоматизировано проводить первоначальную выборку компоновок из базы проектов по заданным параметрам; реализует разработанный автором алгоритм оптимизации выбора компоновочного решения; позволяет производить расчет проверки согласованности мнений экспертов по критерию Кендалла и расчет рисков по критерию Сэвиджа.

Программа реализована в среде Visual Studio 2015. Язык программирования C++. Экранные формы программного обеспечения представлены на рисунке 3.

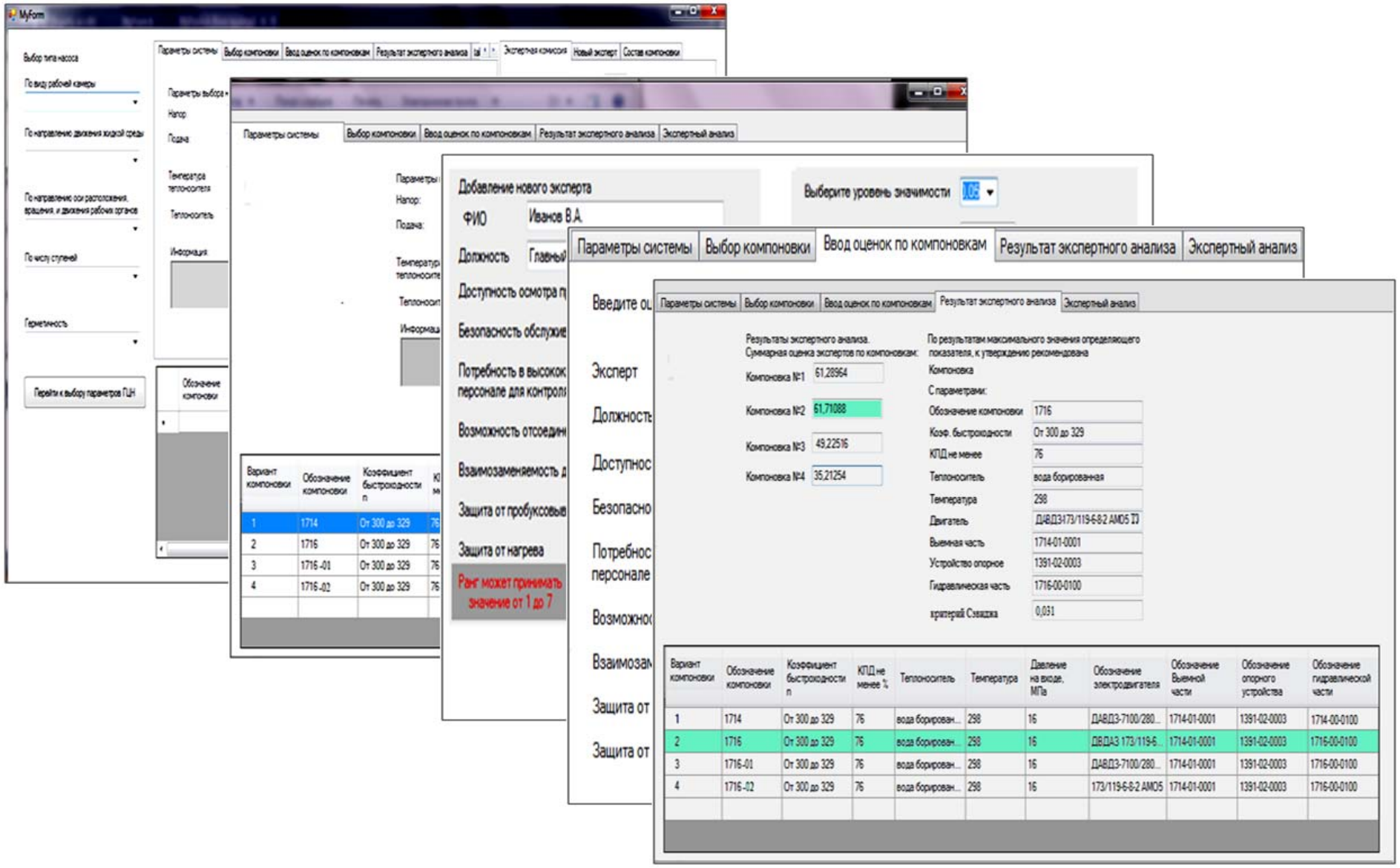


Рисунок 3 – Экранные формы работы программного обеспечения

**Выводы по третьей главе.** В результате реализации алгоритма выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования в программном обеспечении достигнуты практические результаты и сделаны следующие выводы:

– разработан алгоритм работы программного обеспечения, позволивший автоматизировать процесс выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС;

– проведена апробация алгоритмов и работы программного обеспечения при выборе конструкции «антиреверсного устройства» для проекта АЭС «Куданкулам» и компоновочного решения насосного оборудования для проекта «Белорусской АЭС», которая доказала эффективность применения предложенных алгоритмов и программного обеспечения;

– получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615035.

**В четвертой главе** приведены практические результаты апробации методики.

*Результаты выбора оптимального компоновочного решения при наличии нескольких компоновочных решений из базы проектов.*

В соответствии с заданными в ТС требованиями из базы проектов были подобраны четыре проекта: 1714, 1716, 1716-01 и 1716-02. При сравнении компоновок для заданного проекта АЭС были получены следующие результаты.

Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества по результатам анкетирования экспертной группы составили: показатели назначения – 0,26; показатели технологической и энергетической эффективности – 0,197; показатели надежности – 0,158; конструктивные и технологические показатели – 0,132; требования к безопасности и охране окружающей среды – 0,106; эстетические и эргономические показатели – 0,071; требования к транспортированию и хранению – 0,076. Состав экспертной комиссии. Экспертная группа: конструктор-разработчик, начальник конструкторского отдела; главный технолог; начальник расчетной лаборатории; главный конструктор по насосному оборудованию. Секретарь комиссии – сотрудник отдела качества. Председатель комиссии – технический директор.

Итоговая таблица оценок компоновочных решений насосного оборудования с учетом рисков представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Итоговая суммарная оценка компоновочных решений и величин рисков принятия решения

| *№ п/п* | *Обозначение компоновки* | *Суммарная оценка экспертной комиссии* | *Величина риска (критерий Сэвиджа)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 1714 | 61,270 | 0,185 |
| 2 | 1716 | 61,710 | 0,031 |
| 3 | 1716-01 | 49,230 | 0,197 |
| 4 | 1716-02 | 35,270 | 0,197 |

По результатам сравнения компоновочных решений насосного оборудования для дальнейшей проработки было утверждено компоновочное решение № 2 – проект 1716, эффективность выбора данного решения оценивается минимальным значением критерия риска из числа оцениваемых решений – 0,031.

*Результаты выбора оптимального компоновочного решения при наличии синтезированного компоновочного решения и компоновочных решений из базы проектов.*

В соответствии с заданными в ТС требованиями из базы проектов были подобраны проекты 1391 и 1732, и синтезировано новое компоновочное решение – 1753. При сравнении компоновочных решений насосного оборудования из базы данных проектов и синтезированного проекта для АЭС были получены следующие результаты. Распределение весовых коэффициентов групп показателей качества по результатам анкетирования экспертной группы: показатели назначения – 0,26; показатели технологической и энергетической эффективности – 0,197; показатели надежности – 0,158; конструктивные и технологические показатели – 0,132; требования к безопасности и охране окружающей среды – 0,106; эстетические и эргономические показатели – 0,071; требования к транспортированию и хранению – 0,076. Состав экспертной комиссии. Экспертная группа: конструктор-разработчик, начальник конструкторского отдела; главный технолог; начальник расчетной лаборатории; главный конструктор по насосному оборудованию. Секретарь комиссии – сотрудник отдела качества. Председатель комиссии – технический директор.

Итоговая таблица оценок компоновочных решений насосного оборудования с учетом рисков представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Итоговая суммарная оценка компоновочных решений и величин рисков принятия решения

| *№ п/п* | *Обозначение компоновки* | *Суммарная оценка экспертной комиссии* | *Величина риска (критерий Сэвиджа)* |
|---|---|---|---|
| 1 | 1391 | 73,03 | 0,255 |
| 2 | 1732 | 60,99 | 0,267 |
| 3 | 1753 | 73,47 | 0,101 |

По результатам сравнения компоновочных решений насосного оборудования для дальнейшей проработки было утверждено компоновочное решение № 2 – проект 1753, эффективность выбора данного решения оценивается минимальным значение критерия риска из числа оцениваемых решений – 0,101

В главе приведена структура стандарта организации «Верификация проекта оборудования», содержащая процедуры необходимые для практического применения разработанной методики оптимизации выбора, а также проиллюстрированы в условиях реального производства возможности программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс принятия решения.

**Выводы по четвертой главе.** В результате апробации методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС в условиях реального проектирования и производства можно сделать следующие выводы:

– применение методики позволило снизить субъективный фактор при принятии решения о выборе прототипа компоновочного решения насосного оборудования для конкретного проекта АЭС;

– разработанная методика выбора оптимального компоновочного решения автоматизирована, что позволило сократить трудоемкость принятия решения на начальном этапе технического проектирования;

– разработаны рекомендации по применению методики и программы «ОцКом» в организациях, занимающихся вопросами проектирования насосного оборудования;

– в связи с введением в действие в 2015 году ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015) и GSR Part 2 в современных проектах требуется обязательное внедрение риск-ориентированного мышления на каждом этапе жизненного цикла продукции, разработанная методика и ее реализация в программном обеспечении обеспечили внедрение риск-ориентированного мышления на начальном этапе техничного проектирования насосного оборудования;

– внедрение риск-ориентированного мышления позволило улучшить процесс конструкторское проектирование за счет снижения рисков выбора неоптимального компоновочного решения.

**В приложениях** приведены материалы внедрения результатов диссертации: программный код программы автоматизированного выбора оптимального компоновочного решения при проектировании НО для АЭС; копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ; стандарт организации «Верификация проекта оборудования».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная в научном отношении и практически важная задача по разработке методики выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС. Получены следующие основные результаты:

1. Проведен системный анализ процесса конструкторское проектирование насосного оборудования для АЭС, в результате которого определен этап процесса, требующий улучшения, а именно начальный этап стадии «техническое проектирование».

2. Предложена уточненная классификация основных показателей качества насосного оборудования на начальном этапе технического проектирования, отличающаяся тем, что оценка проводится по семи группам показателей качества: показатели назначения; показатели технической и энергетической эффективности; конструктивные и технологические показатели; показатели надежности; требования к безопасности и охране окружающий среды; эстетические и эргономические показатели; требования к транспортированию и хранению. Стандартизованная группа «показателя назначения» дополнена показателем «коэффициент быстроходности».

3. Впервые разработана квалиметрическая модель оценки синтезированного компоновочного решения насосного оборудования, позволяющая оптимизировать выбор компоновочного решения насосного оборудования для АЭС.

4. Впервые разработан алгоритм выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования с оценкой рисков, возникающих при подготовке проектной документации.

5. Разработанный алгоритм и квалиметрическая модель оценки компоновочного решения насосного оборудования реализованы в программном обеспечении, позволяющем автоматизировать процесс принятия решения по выбору компоновки

насосного оборудования (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017615035).

6. Основные результаты исследований приняты к использованию и внедрены в:

– процесс конструкторского проектирования насосного оборудования АО «Центральное конструкторское бюро машиностроения», методика выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для АЭС реализована в стандарте организации «Верификация проекта оборудования»;

– учебном процессе Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в рабочих программах дисциплин «Конструирование и производство типовых приборов и устройств», «Менеджмент и инжиниринг качества» и «Инженерные методы обеспечения качества продукции».

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В редактируемых научных изданиях**

1. Виноградова, Г.С. Оценка и выбор компоновочного решения при разработке оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов / Г.С. Виноградова, А.В Марков // Качество и жизнь. – 2016. – № 2. – С. 2-7.

2. Виноградова, Г.С. Алгоритм выбора прототипа конструкции на этапе технического проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии / Г.С. Виноградова, А.В. Марков // Вестник ИрГТУ. – 2016. Том 20. – № 9. – С. 17-22.

3. Виноградова, Г.С. Автоматизация процесса выбора компоновки сложных технических систем / А.В. Марков, Г.С. Виноградова, А.И. Денисенко, А.А. Хлебников // Вестник ИрГТУ. – 2016. – Том 20. – № 11. – С. 94-101.

**Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ**

4. Программа по выбору компоновочного решения при проектировании технических систем: св-во 2017615035 Рос. Федерация. № 20199.3881 заявл. от 19.12.2016; опубл. 02.05.2017, Бюл. № 5-2017.

**В других научных изданиях**

5. Виноградова, Г.С. Система менеджмента качества в атомной энергетике / Г.С. Виноградова // Сборник докладов Конференции «Шаг в будущее:…», 25-27 мая 2015 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2015. – С 32-34.

6. Виноградова, Г.С. Оценка качества и показатели качества ремонтируемой продукции / Г.С. Виноградова // Сборник докладов конференции «Инновации в формировании стратегического вектора развития фундаментальных и прикладных научных исследований, 20-21 ноября 2015 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2015. – С. 89-91.

7. Виноградова, Г.С. Международные и национальные требования к системе менеджмента качества в атомной энергетике / Г.С. Виноградова // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской научно-технической конференции Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. –Т. 1. С. 303-305.

8. Виноградова, Г.С. Внедрение риск-ориентированного мышления по ГОСТ Р ИСО 9001-2015 при изготовлении продукции для ОИАЭ / Г.С. Виноградова // Экономические аспекты развития энергетики. Энергия-2016. Одиннадцатая международная научно-техническая

конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 5-7 апреля 2016 г., г. Иваново: материалы конференции в 6 т. – Иваново: ИГЭУ, 2016. – Том 6. – С. 8-9.

9. Виноградова, Г.С. Применение экспертных методов при проектировании оборудования для опасных производственных объектов / Г.С. Виноградова // Молодежь, техника, космос: материалы VIII Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. / Бал. гос. техн. ун-т. – СПб., 2016. – С. 42.

10. Vinogradova G.S. Automation of qualimetric method of selecting layout solution of pumping equipment for NPPS / G.S. Vinogradova // International scientific journal “Mathematical modeling” / Scientific technical union of mechanical engineering “Industry 4.0”. – Sofia, Bulgaria. – 2017. – PP. 41-43.

Подписано в печать 16.02.2018. Формат бумаги 60×84/16. Бумага документная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1. Тираж 70 экз. Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета.
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ».
Типография БГТУ, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.