



Оригинальная статья / Original article

УДК: 658.562.012.7

DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-17-22

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПРОТОТИПА КОНСТРУКЦИИ НА ЭТАПЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

© Г.С. Виноградова¹, А.В. Марков²

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье предложен алгоритм методики сравнительного анализа нескольких компоновочных решений проектируемого насосного оборудования с целью выбора оптимального из них с учетом основных показателей качества: эксплуатационных параметров, показателей безопасности и надежности. **МЕТОДЫ.** Существуют различные методы обработки экспертных оценок, их анализ показал, что для оценки результатов проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии оптимальным по точности, трудоемкости и временным затратам является метод средневзвешенных экспертных оценок. На основе этого метода разработана методика выбора оптимального компоновочного решения из нескольких вариантов при разработке нового оборудования. **ВЫВОДЫ.** Реализация разработанного алгоритма в специализированном программном обеспечении позволяет автоматизировать и оптимизировать процесс выбора компоновочного решения на этапе технического проектирования насосного оборудования.

Ключевые слова: качество, безопасность, надежность, атомная энергетика, насосное оборудование, алгоритм.

Формат цитирования: Виноградова Г.С., Марков А.В. Алгоритм выбора прототипа конструкции на этапе технического проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 9. С. 17–22. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-17-22

AN ALGORITHM OF DESIGN PROTOTYPE SELECTION AT THE STAGE OF ENGINEERING DEVELOPMENT OF NUCLEAR FACILITY PUMPING EQUIPMENT

G.S. Vinogradova, A.V. Markov

Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov, 1, 1st Krasnoarmeyskaya St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation.

ABSTRACT. PURPOSE. The article proposes an algorithm of the comparative analysis procedure for several layout solutions of designed pumping equipment in order to select the optimal one considering the main quality indicators: operational parameters, safety and reliability indicators. **METHODS.** Having analyzed various methods of expert assessment processing the authors found that the best one in terms of accuracy, labor intensity and time expenditure is the method of weighted average expert assessments for the evaluation of design results of pumping equipment for nuclear facilities. The procedure of choosing an optimal layout solution from several options under the design of new equipment has been developed on the basis of this method. **CONCLUSIONS.** Implementation of the developed algorithm in dedicated software allows to automate and optimize the process of selecting the layout solution at the stage of engineering development of pumping equipment.

Keywords: quality, safety, reliability, nuclear power engineering, pumping equipment, algorithm

For citation: Vinogradova G.S., Markov A.V. An algorithm of design prototype selection at the stage of engineering development of nuclear facility pumping equipment. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2016, vol. 20, no. 9, pp. 17–22. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-9-17-22

¹Виноградова Галина Сергеевна, аспирант, e-mail: vinogradovag@mail.ru

Vinogradova Galina, Postgraduate, e-mail: vinogradovag@mail.ru

²Марков Андрей Валентинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инжиниринга и менеджмента качества, e-mail: markov-av@mail.ru

Markov Andrey, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering and Quality Management, e-mail: markov-av@mail.ru



Введение

Доля электроэнергии, вырабатываемой атомными электрическими станциями (АЭС), растет, в связи с чем заключаются новые договоры и контракты на строительство энергоблоков АЭС как в России, так и за рубежом. Государственной корпорацией «Росатом» разработаны «дорожные карты», стратегической целью которых является сооружение 16 энергоблоков в России (до 2027 г.) и 38 энергоблоков в других странах (до 2030 г.)

Ключевые задачи при реализации мероприятий, предусмотренных «дорожными картами», следующие: строгое соблюдение графиков проектирования и сооружения блоков АЭС; применение инновационных технологий и материалов, обеспечивающих лидерство строительного комплекса атомной отрасли РФ; выполнение проектных показателей: срок – стоимость – качество – безопасность сооружения АЭС. Для решения указанных задач необходима оптимизация процессов проектирования и производства строительно-монтажных работ. В целях повышения конкурентоспособности российской продукции (проекта станции) разработчики стремятся снизить сроки ввода в эксплуатацию каждого нового блока АЭС. Соответственно качество, надежность и безопасность российских АЭС должны быть на заданном уровне.

Важным элементом реакторного контура (контура циркуляции теплоносителя) является главный циркуляционный насос (ГЦН). В системе мощной АЭС любого типа, и в частности с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), циркуляция теплоносителя в нормальной эксплуатации принудительная. Большая протяженность циркуляционного контура, составляющая, например, для каждой петли ВВЭР-1000 более 46 м, довольно высокая скорость теплоносителя и стремление к компактности размещения оборудования приводят к значительным сопротивлениям, преодоление которых за счет естественной циркуляции возможно только при малой нагрузке, что и используется в аварийных ситуациях. ГЦН предназначен для работы

при высоком давлении, но может работать и при низком – начиная с 2,0 МПа, что необходимо при пусковых операциях.

К главному циркуляционному насосу предъявляются такие же высокие требования по качеству, безопасности и надежности, как и к реакторной установке. Главный циркуляционный насос – это оборудование 1-го класса безопасности. Таким образом, задача обеспечения качества в атомной энергетике – это, в первую очередь, обеспечение надежности и безопасности оборудования, применяемого на АЭС.

Во всех отраслях машиностроения важнейшим является процесс проектирования, для улучшения которого, а также для уменьшения времени на начальном этапе – этапе технического проектирования, требуется выбрать оптимальную компоновку прототипа для обеспечения требований и параметров, указанных в технической спецификации (ТС). На основе выбранной компоновки идет процесс проработки конструкции и выпуск технического задания (ТЗ).

Выбранное и утвержденное на подэтапе «техническое проектирование» компоновочное решение главного циркуляционного насоса, применяемого на АЭС для перекачки теплоносителя, существенно влияет на металлоемкость, компактность, выходные характеристики, удобство обслуживания, надежность и безопасность, стоимость и, в конечном итоге, конкурентоспособность АЭС в целом. Только сравнительный анализ компоновок по определенным параметрам позволит выбрать оптимальное решение.

В данной статье предлагается алгоритм методики сравнительного анализа нескольких компоновочных решений проектируемого насосного оборудования с целью выбора оптимального из них с учетом основных показателей качества: эксплуатационных параметров, показателей безопасности и надежности. Применение предлагаемой методики на этапе технического проектирования позволит выявить более удачную геометрическую компоновку



изделия и, следовательно, значительно снизить затраты на следующих этапах проектирования, изготовления и сервисного обслуживания объекта³⁻⁵[1]. Применение предложенной методики особенно актуально при создании насосного оборудования для объектов атомной энергии, где сроки проектирования нового изделия крайне

жестки, а требования по безопасности высоки.

Предлагаемые методические решения реализованы в программном обеспечении автоматизированного расчета оптимизации компоновочного решения насосного оборудования АЭС.

Актуальность работы

Важнейшим этапом процесса проектирования изделий является выбор оптимального прототипа из имеющейся базы данных или утверждение компоновочного решения из возможных новых эскизных проектов. Таким образом, задача утверждения компоновочного решения на этапе технического проектирования – это управленческая задача. Выбор приемлемого варианта должен быть оптимальным в силу заданного критерия. Большинство факторов выступают определяющими в процессе принятия решения, и такие факторы мо-

гут быть качественными, то есть не поддающимися какой-либо количественной характеристике. Также существуют неизменные факторы, установленные заказчиком и/или нормативно-техническими документами. В связи с этим разработка алгоритма, способного обеспечить принятие важных управленческих решений в рамках выбора прототипа конструкции насосного оборудования, весьма актуальна. Алгоритм создавался на основе таких известных методов, как оптимизация, экспертная оценка, исследование операций и др.

Критерий выбора оптимального компоновочного решения

Принципиальное отличие выбора оптимального компоновочного решения от выбора по заданным показателям качества состоит в том, чтобы добиться не просто требуемых показателей, а наилучших показателей при соблюдении заданных требований и ограничений по компоновке оборудования. Поэтому данная задача оптимизации является по существу задачей вариационного типа, когда требуется подобрать компоновку, а также параметры насосного оборудования таким образом, чтобы получить максимум функционала, который в данном случае служит критерием оптимальности принятого компоновочного решения. Функционал, максимум которого

нужно получить, в общем случае должен представлять любую желаемую комбинацию оценок различных качеств проектируемого оборудования. При разработке алгоритма был использован следующий критерий оптимальности [2, 3]:

$$I = \int_{s_0}^{s_1} f(x_1, x_2, \dots, x_n) ds.$$

В качестве x_i выступают как технические характеристики проектируемого насосного оборудования, так и количественные оценки того или иного свойства создаваемого оборудования, а критерий s может быть не только временем, но и любой другой физической или даже условной

³ГОСТ 15.601-98 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое обслуживание и ремонт техники. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1999. 8 с. / GOST 15.601-98 System of Product Development and Launching into Manufacture. Maintenance and Repair of Equipment. Main Provisions. Moscow, Publishing House of Standards, 1999, 8 p.

⁴ГОСТ 14.205-83 Технологичность конструкции изделий. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009. 22 с. / GOST 14.205-83 Workability of Product Design. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2009, 22 p.

⁵ГОСТ 18322-78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2007. 65 с. / GOST 18322-78 System of Equipment Maintenance and Repair. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 65 p.



комбинированной независимой переменной.

На этапе технического проектирования, где осуществляется выбор оптимального компоновочного решения, зачастую, особенно при разработке нового оборудования, может быть недостаточно статистических данных для принятия оптимального решения, и в этом случае оценку компоновочных решений производят путем применения метода экспертных оценок.

Существуют различные методы обработки экспертных оценок. Их анализ показал, что для оценки результатов проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии оптимальным по точности, трудоемкости и временным затратам является метод средневзвешенных экспертных оценок. На основе этого метода разработана методика выбора оптимального компоновочного решения из нескольких вариантов. Применение метода средневзвешенных экспертных оценок для выбора компоновочного решения по основным показателям качества (эксплуатационным параметрам, показателям безопасности и надежности) с проведением оценки согласованности мнений экспертов по критерию Кендалла подробно описано в работе [4].

Описание алгоритма

Для принятия оптимального управленческого решения по выбору компоновочного решения насосного агрегата разработана методика [4]. Данная методика реализована в программном обеспечении, что позволяет:

- проводить первоначальную выборку компоновок из базы данных по заданным параметрам;
- реализовать методику экспертной оценки;
- производить расчет проверки согласованности мнений экспертов по критерию Кендалла.

Алгоритм выбора компоновочного решения предполагает следующие действия:

1. При получении ТС от заказчика

Авторская методика экспертной оценки состоит из трех частей.

1. Если из базы данных подобрано несколько компоновочных решений предыдущих проектов, удовлетворяющих заданным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС, проводится расчет комплексного показателя качества (или так называемый определяющий показатель качества). Применяется экспертный метод, оценки выставляются по трехбалльной шкале.

2. Если есть новые компоновочные решения и решения из базы данных предыдущих проектов, удовлетворяющие требованиям ТС, сравнение таких компоновок проводится также экспертным методом с расчетом определяющего показателя качества. Оценки выставляются по шкале желательности Харрингтона.

3. Экспертная оценка проводится группой экспертов (более трех) по специально разработанным авторами опросным листам. В опросных листах определен специальный набор показателей качества (авторами уточнена номенклатура основных показателей качества насосного оборудования на этапе технического проектирования). Согласованность мнений экспертов проверяется по критерию Кендалла.

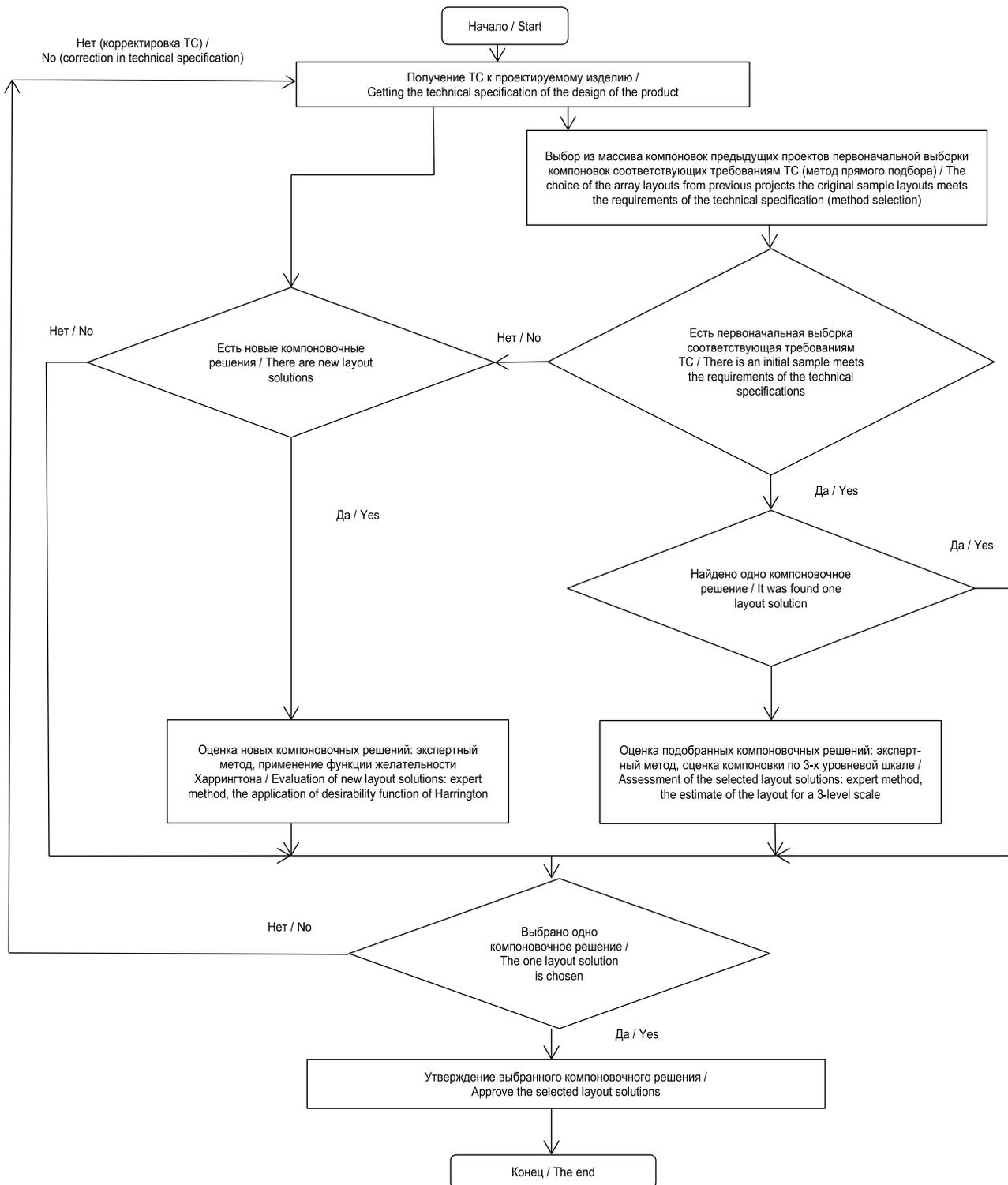
конструктор производит выбор компоновочного решения:

- 1.1. Определяется возможность разработки 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, удовлетворяющую основным эксплуатационно-технологическим параметрам, соответствующим ТС.

2. Далее возможны четыре варианта выбора компоновочного решения:

- 2.1. Если из базы данных с применением программного обеспечения подобрано одно компоновочное решение, соответствующее заданным в ТС параметрам,



Обобщенный алгоритм выбора прототипа конструкции на этапе технического проектирования насосного оборудования

Generalized algorithm of design prototype selection at the stage of pumping equipment engineering development

оно сравнивается экспертным методом [4] с новым компоновочным решением (при его наличии). Результат сравнения принимается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

2.2. Если из базы данных с применением программного обеспечения подобрано несколько компоновочных решений предыдущих проектов, удовлетворяющих заданным эксплуатационно-технологичес-



ким параметрами, определенным в ТС, то проводится расчет комплексного показателя качества по методике, определенной в работе [4]. Компонировка, подобранная из базы данных предыдущих проектов, с максимальным значением комплексного показателя качества сравнивается с новым компоновочным решением (при его наличии), результат сравнения принимается в качестве прототипа компоновки и дальнейшей проработки и выпуска ТЗ.

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

технологическим параметрам ТС, предлагаются новые компоновочные решения (этап 1.1). Проводится оценка новых компоновок по основным эксплуатационно-технологическим параметрам [4] и выбор наилучшей компоновки с целью принятия окончательного решения для проработки и выпуска ТЗ.

2.4. При отсутствии компоновочного решения, соответствующего эксплуатационно-технологическим параметрам, заданным ТС, конструктор обращается к разработчику ТС за корректировкой параметров к проектируемому изделию, указанных в ТС.

Выводы

Реализация разработанного алгоритма в специализированном программном обеспечении позволяет автоматизировать и оптимизировать процесс выбора компоновочного решения на этапе технического проектирования насосного оборудования. Применение предложенного алгоритма

снижает затраты на проектирование и позволяет обеспечить требуемое качество насосного оборудования. Последнее особенно важно, так как данное оборудование используется на объектах повышенной опасности.

Библиографический список

1. Аристов А.И., Волков П.Н., Дубицкий Л.Г. и др. Ремонтопригодность машин. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. 13-е изд., исправл. М.: Наука, 1986. 544 с.
3. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при мно-

- гих критериях: предпочтения и замещения / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
4. Виноградова Г.С., Марков А.В. Оценка и выбор компоновочного решения при разработке насосного оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов // Качество и жизнь. 2016. № 2. С. 5–10.

References

1. Aristov A.I., Volkov P.N., Dubitskii L.G. i dr. Remontoprigodnost' mashin [Maintainability of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 368 p. (In Russian)
2. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Reference book on mathematics for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 544 p. (In Russian)
3. Kini R.L., Raifa Kh. Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochtleniya i zameshcheniya [Multiple

- criteria decision-making: preference and substitution]. Moscow, Radio i svyaz. Publ., 1981, 560 p.
4. Vinogradova G.S., Markov A.V. Otsenka i vybor komponovochnogo resheniya pri razrabotke nasosnogo oborudovaniya dlya ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi energii s uchetom kompetentnosti privlekaemykh ekspertov [Assessment and layout solution selection in the design of pumping equipment for nuclear facilities taking into account the competence of experts]. Kachestvo i zhizn' [Quality and life]. 2016, no. 2, pp. 5–10. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов. Авторы в равной степени ответственны при обнаружении плагиата.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalizing of scientific results. The authors bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Статья поступила 15.07.2016 г.

The article was received 15 July 2016