



Оригинальная статья / Original article
УДК: 004.9/658.5
DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-94-101

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА КОМПОНОВКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© А.В. Марков¹, Г.С. Виноградова², А.И. Денисенко³, А.А. Хлебников⁴

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ работы является автоматизация процесса выбора компоновки сложных технических систем. **МЕТОДЫ** исследования включают: методы системного анализа и концептуального проектирования, методы проектирования систем поддержки принятия решений. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана концептуальная модель предметной области. Определены требования к автоматизированной системе выбора компоновки сложных технических систем. Осуществлена программная реализация базовых функций системы. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Авторами разработано программное обеспечение, реализующее функции поддержки принятия управленческого решения при проектировании сложных технических систем.

Ключевые слова: качество, безопасность, надежность, атомная энергетика, информационные технологии, техническая система, система поддержки принятия решений.

Формат цитирования: Марков А.В., Виноградова Г.С., Денисенко А.И., Хлебников А.А. Автоматизация процесса выбора компоновки сложных технических систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 11. С. 94–101. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-94-101

AUTOMATION OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEM LAYOUT SELECTION

A.V. Markov, G.S. Vinogradova, A.I. Denisenko, A.A. Khlebnikov

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

ABSTRACT. THE PURPOSE of this work is automation of the process of complex engineering system layout selection. The research **methods** include the methods of system analysis and conceptual design as well as the design methods of decision support systems. **RESULTS.** A conceptual model of the object domain is developed. The requirements for the automated system of complex engineering system layout selection are specified. Software implementation of the core functions of the system is performed. **CONCLUSION.** The authors have developed the software that implements the support functions for making managerial decisions when designing complex engineering systems.

Keywords: quality, safety, reliability, nuclear power engineering, information technologies, technical system, decision support system

For citation: Markov A.V., Vinogradova G.S., Denisenko A.I., Khlebnikov A.A. Automation of complex engineering system layout selection. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016, vol. 20, no. 11, pp. 94–101. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-11-94-101

Введение

Стратегическими целями госкорпорации «Росатом» являются: повышение доли продукции на международных рынках; снижение себестоимости продукции и сро-

ков протекания процессов жизненного цикла продукции; разработка и поставка новых продуктов для российского и международных рынков. Для реализации этих целей

¹Марков Андрей Валентинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инжиниринга и менеджмента качества (И2), e-mail: markov-av@mail.ru

Markov Andrei, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering and Quality Management (I2), e-mail: markov-av@mail.ru

²Виноградова Галина Сергеевна, аспирант, e-mail: vinogradovag@mail.ru

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

³Денисенко Александр Игоревич, магистрант, e-mail: denisenko.bstu@gmail.com

Denisenko Aleksandr, Master's degree student, e-mail: denisenko.bstu@gmail.com

⁴Хлебников Александр Александрович, магистрант, e-mail: byp1k@mail.ru

Khlebnikov Aleksandr, Master's degree student, e-mail: byp1k@mail.ru



ставятся жесткие сроки по вводу блоков в эксплуатацию, уделяется большое внимание выбору материалов и внедрению инновационных конструкций. При этом качество, надежность и безопасность российских проектов блоков АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) должны быть на заданном уровне. Современные технологии позволяют проектировать и строить атомные станции нового поколения «3+» с реакторами ВВЭР-1200. Основные характеристики реактора: тепловая мощность – 3200 МВт, теплоноситель – вода с борной кислотой под давлением 16,2 МПа.

Одним из важнейших элементов реакторной установки АЭС является насосное оборудование первого контура – главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦН) – 1-го класса безопасности. К этому оборудованию предъявляются такие же высокие требования по безопасности и надежности, как и к реакторной установке

ГЦН – это сложная техническая система, которая, как и все аналогичные технические системы, имеет структуру (строение, устройство, взаиморасположение элементов и связей), задающую устойчивость и воспроизводимость функции технической системы. Каждая составная часть технической системы имеет в ней индивидуальное функциональное назначение (цели использования). Из определения технической системы, следует, что для выполнения заданных функций она должна обладать определенной структурой и взаимным расположением составных элементов, то есть соответствующей компоновкой.

Методы исследования и их этапы

Актуальность работы. Важнейшим этапом процесса проектирования насосного оборудования является выбор оптимального компоновочного решения ГЦН, что представляет собой управленческую задачу. Случается, что управленческие решения принимаются либо в отсутствие достаточного объема статистической информации (оценка новых разработок), либо управленческое решение принимается

Компоновка насосного оборудования – совокупность проектных работ по обоснованию формы насоса, взаимного расположения узлов и систем. Именно в процессе компоновки создается вся конструкция будущего насоса. При выборе компоновки определяется не только целесообразное расположение его устройств и узлов, но и устанавливаются оптимальные размеры и формы поверхностей деталей, выбор материалов, соответствующих технико-экономическим требованиям, заданным в технической спецификации (ТС). От объема насоса зависит его масса, занимаемая им площадь в помещении машинного зала, а также транспортные расходы. Следовательно, общей тенденцией в ходе проектирования является стремление к уменьшению габаритов конструкции при оптимальной компоновке (т.е. стремление к компактности конструкции).

Целью работы является автоматизация процесса выбора компоновочного решения насосного оборудования для АЭС на этапе технического проектирования. Для реализации этой цели авторами разработано специальное программное обеспечение.

Применение предлагаемого программного обеспечения на этапе технического проектирования позволяет выявить более удачную геометрическую компоновку изделия, а следовательно, значительно снизить затраты на следующих этапах проектирования, изготовления и сервисного обслуживания [1–3].

руководителем при необходимости обработки большого объема информации в сжатые сроки. В таких случаях для помощи в принятии оптимального решения и снижения рисков разрабатывается специальное программное обеспечение, относящееся к системам поддержки принятия решений. В данной статье рассматриваются алгоритм и принцип работы такого программного обеспечения, разработанного авторами.



Цели разработки автоматизированной системы выбора компоновки.

Выбор компоновки насосного оборудования осуществляется на этапе технического проектирования. При выборе компоновки реализуется как системный, так и инновационный подход, заключающийся в поиске новых конструктивных решений. Системный подход основан на базовом и агрегатно-модульном методах проектирования (или унификации), когда конструкция продукции создается на основе базовой модели с новой комбинацией усовершенствованных функциональных модулей и отдельных унифицированных элементов. Инновационный подход заключается в поиске новых конструктивных решений, оценке их возможностей и рисков применения. Независимо от подхода к выбору компоновки ее окончательный вариант принимается в процессе совместной работы экспертов и руководителя экспертной группы. Решение этого вопроса зависит от предназначения продукции, ее индивидуальных характеристик, параметров, уровня унификации, условий эксплуатации, а также от степени развития и достижений техники в целом и многих других факторов, которые в обязательном порядке учитываются системой поддержки принятия решений.

Системы поддержки принятия решений (СППР) или системы интеллектуальной поддержки принятия решений (ИППР) – это компьютерные системы, использующие данные и модели, применяемые при принятии слабоформализованных решений. Данные извлекаются из системы диалоговой обработки запросов или базы данных. Пользователь работает в СППР посредством интерфейса, выбирает модель и набор данных, которые необходимо

использовать. В программах СППР осуществляется распределение функций между человеком и компьютером: главная роль при анализе событий, принятии решений в неопределенных ситуациях отводится человеку, компьютер выполняет функции поддержки.

Цели разработки автоматизированной системы выбора компоновки:

- создание пополняемой базы компоновок ГЦН;
- автоматизация процесса оценки и выбора компоновки из базы данных по заданным параметрам;
- автоматизация процесса сравнения новых и имеющихся компоновок.

Обзор реестра свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ Федерального института промышленной собственности (ФИПС) показал, что аналогов такому специальному программному обеспечению нет. В связи с этим целесообразно разработать программное обеспечение, реализующее все необходимые функции.

Алгоритм работы пользователя с программным обеспечением. Авторами разработано программное обеспечение «Выбор компоновочных решений при проектировании технических систем», реализующее квалиметрическую методику оценки и выбора оптимального компоновочного решения насосного оборудования для объектов использования атомной энергии [2, 3].

Разработанное программное обеспечение можно отнести к системам поддержки принятия решений. Концептуальная модель структуры программного обеспечения приведена на рис. 1^{5,6}. Программа реализована в среде Visual Studio 2015, язык программирования – C++⁷ [4].

⁵Романова И.В. Интеллектуальные подсистемы САПР: конспект лекций. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 64 с. / Romanova I.V. Intelligent CAD subsystems. Omsk: Omsk State Technical University Publishers, 2008. 64 p.

⁶Семенов В.С., Золотов В.П. Системы автоматизации проектных работ: курс лекций. Самара: Изд-во СамГТУ, 2012. 134 с. / Semenov V.S., Zolotov V.P. Design work automated systems. Samara: Samara State Technical University Publishers, 2012. 134 p.

⁷Кондаков А.И. САПР технологических процессов: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2007. 272 с. / Kondakov A.I. CAD of technological processes. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 272 p.

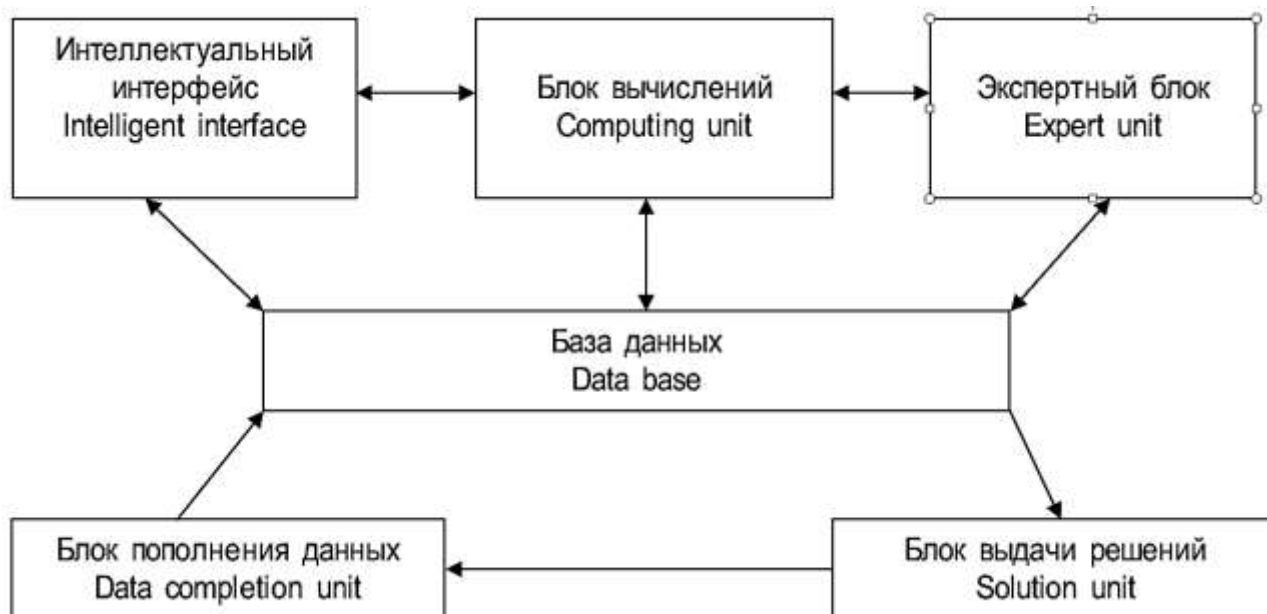


Рис. 1. Концептуальная модель структуры программного обеспечения
Fig. 1. Software structure conceptual model

Алгоритм работы пользователя с программным обеспечением «Выбор компоновочных решений при проектировании технических систем» состоит из четырех блоков:

1. Проводится первоначальная выборка компоновок из базы данных по параметрам, заданным в технической спецификации (ТС). Если из базы данных подобрано несколько компоновочных решений предыдущих проектов, удовлетворяющих заданным эксплуатационно-технологическим параметрам, определенным в ТС, проводится расчет определяющего показателя качества [2, 3]. Применяется экспертный метод, по трехбалльной шкале выставляются оценки M_i соответствия показателя качества требованиям ТС: 4 балла – компоновка превышает требования ТС по n -му показателю качества, 2 балла – компоновка соответствует требованиям ТС по n -му показателю качества, 0 баллов – компоновка не соответствует требованиям ТС по n -му показателю качества.

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.

Тогда M_i оценки показателя качества по n -му показателю для k -й компоновки определяются согласно функциональной желательности Харрингтона:

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

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

4. При отсутствии компоновочного решения, соответствующего эксплуатаци-



онно-технологическим параметрам, заданным ТС, следует обращение к разработчику ТС за корректировкой параметров к проектируемому изделию.

Разработанное авторами программное обеспечение позволяет: провести первоначальную выборку компоновок из базы данных по заданным параметрам; реализовать методику экспертной оценки; произвести расчет проверки согласованности мнений экспертов по критерию Кенделла.

Интерфейс программного обеспечения приведен на рис. 2. В данном интерфейсе программы производится выбор типа насоса, и задаются параметры насоса для подбора соответствующей компоновки из базы данных. Оператор заполняет вкладку «Параметры насоса».

В результате работы программы подбираются соответствующие компоновки

из базы данных (рис. 3). Если подходящих компоновок более одной, то проводится экспертный анализ всех компоновок с целью выбора оптимальной.

В программе производится расчет согласованности или несогласованности мнений экспертов при выбранном уровне значимости, есть возможность изменения состава экспертной комиссии (рис. 4).

Оценка компоновочных решений производится каждым экспертом по специально разработанному опросному листу (рис. 5).

При нажатии кнопки «К результатам экспертного анализа» программа производит расчет определяющего показателя качества, и дается рекомендация об утверждении компоновки с максимальным значением этого показателя (рис. 6).

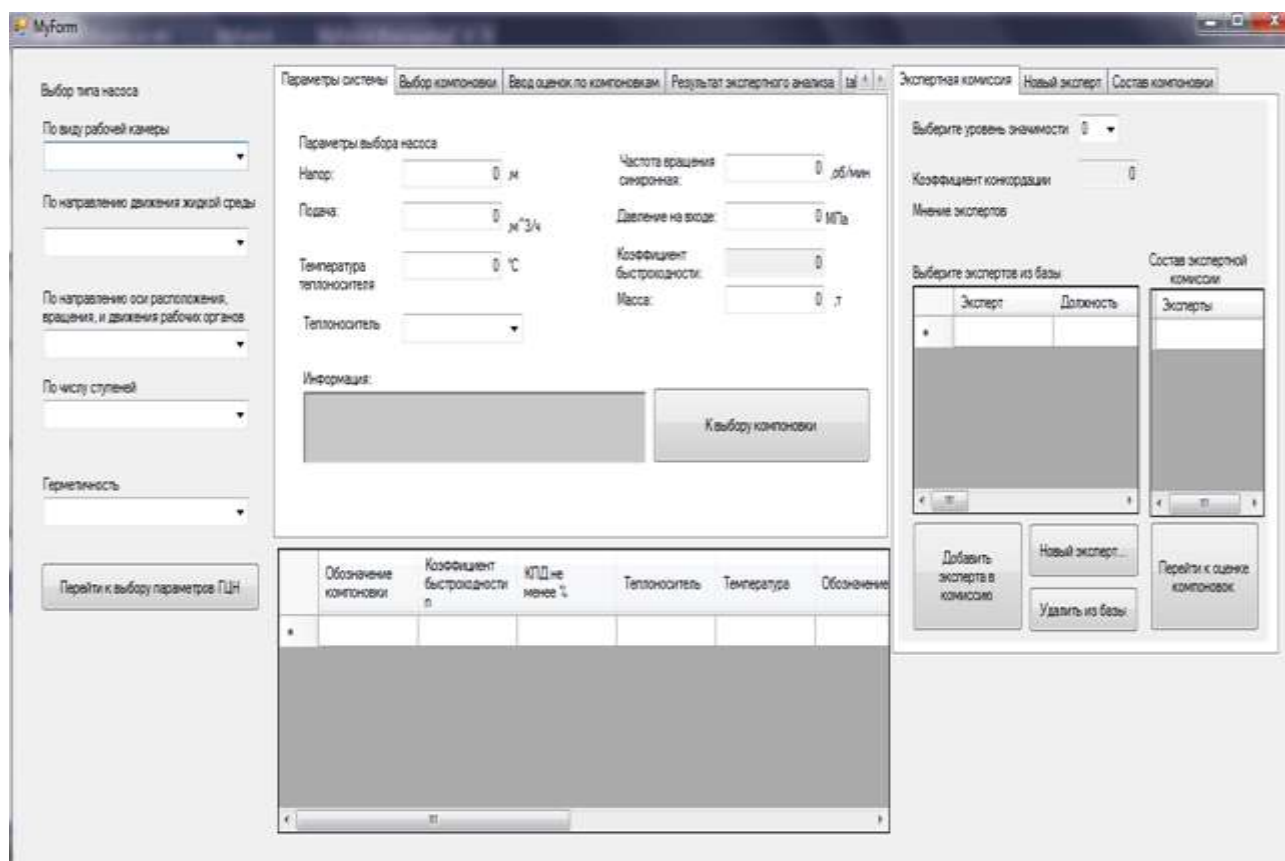


Рис. 2. Интерфейс программы
Fig. 2. Program interface



Панель управления: Параметры системы | Выбор компоновки | Ввод оценок по компоновкам | Результат экспертного анализа | tal

Параметры выбора насоса

Напор:	<input type="text" value="55"/>	.м	Частота вращения синхронная:	<input type="text" value="750"/>	.об/мин
Подача:	<input type="text" value="5"/>	.м ³ /ч	Давление на входе:	<input type="text" value="14"/>	МПа
Температура теплоносителя:	<input type="text" value="270"/>	°С	Коэффициент быстроходности:	<input type="text" value="303.0869"/>	
Теплоноситель:	Вода борированная		Масса:	<input type="text" value="5"/>	.т

Информация:

	Обозначение компоновки	Коэффициент быстроходности п	КПД не менее %	Теплоноситель	Температура	Обозначение
▶	1714	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДВДАЗ 173/1
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	173/119-6-8-2
*						

Рис. 3. Результаты подбора подходящих компоновок из базы данных
Fig. 3. Results of selecting suitable layouts from the database

Добавление нового эксперта

ФИО:

Должность:

Выберите уровень значимости:

Коэффициент конкордации:

Мнение экспертов не согласовано, проведите повторное анкетирование

Выберите экспертов из базы

Эксперт	Должность
Марков А.В.	Главный тех
Виноградова Г.С.	Руководител
Денисенко А.И.	Руководител
▶ Хлебников А.А.	Руководител
Иванов В.А.	Главный кон

Состав экспертной комиссии

Эксперты
Хлебников А.А.
Марков А.В.

Ранг может принимать значение от 1 до 7

Рис. 4. Расстановка ранговых оценок и оценка согласованности мнений экспертов
Fig. 4. Ranking and assessment of expert opinion consistency



Параметры системы | Выбор компоновки | Ввод оценок по компоновкам | Результат экспертного анализа | tal

Введите оценки экспертов для каждой компоновки

Эксперт: Варианты компоновок: №1 №2 №3 №4 Первый эксперт

Должность: №1 №2 №3 №4 Второй эксперт

Доступность осмотра при эксплуатации: 4 2 2 0 >>> Третий эксперт

Безопасность обслуживающего персонала: 2 0 4 2

Потребность в высококвалифицированном персонале для контроля и обслуживания: 4 0 2 4

Возможность отсоединения маховика от ротора: 2 2 4 0

Взаимозаменяемость деталей: 2 2 4 4

Защита от пробуксовывания маховика: 0 4 2 2

Защита от нагрева: 2 2 4 2

	Обозначение компоновки	Коэффициент быстроходности п	КПД не менее %	Теплоноситель	Температура	Обозначение
▶	1714	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДВДАЗ 173/1
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	173/119-6-8-2
*						

Рис. 5. Опросный лист экспертных оценок
Fig. 5. Expert assessment questionnaire

Параметры системы | Выбор компоновки | Ввод оценок по компоновкам | Результат экспертного анализа | tal

Результаты экспертного анализа.

Суммарная оценка экспертов по компоновкам:

Компоновка №1:

Компоновка №2:

Компоновка №3:

Компоновка №4:

По результатам максимального значения определяющего показателя, к утверждению рекомендована Компоновка:

С параметрами:

Обозначение компоновки:

Коэф. быстроходности:

КПД не менее:

Теплоноситель:

Температура:

Двигатель:

Выемная часть:

Устройство опорное:

Гидравлическая часть:

	Обозначение компоновки	Коэффициент быстроходности п	КПД не менее %	Теплоноситель	Температура	Обозначение
▶	1714	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДВДАЗ 173/1
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	ДАВДЗ-7100/
	1716	От 300 до 329	76	вода борирован...	298	173/119-6-8-2
*						

Рис. 6. Результат экспертного анализа
Fig. 6. Expert analysis result



Заключение

Авторами разработано специальное программное обеспечение, реализующее функцию поддержки принятия управленческого решения при проектировании сложных технических систем на примере насосного оборудования. Применение разработанного программного обеспечения позволяет автоматизировать и оптимизировать

процесс выбора компоновочного решения на этапе технического проектирования насосного оборудования для АЭС, обеспечивает верификацию проекта, снижает риск утверждения неоптимальной компоновки, снижает затраты на проектирование и позволяет обеспечить требуемое качество, надежность и безопасность продукции.

Библиографический список

1. Аристов А.И., Волков П.Н., Дубицкий Л.Г., Есин Б.И., Левченко П.Г., Смирнов Н.Н. Ремонтопригодность машин. М.: Машиностроение, 1975. 368 с.
2. Виноградова Г.С., Марков А.В. Оценка и выбор компоновочного решения при разработке оборудования для объектов использования атомной энергии с учетом компетентности привлекаемых экспертов // Качество и жизнь. 2016. № 2. С. 5–10.

3. Виноградова Г.С., Марков А.В. Алгоритм выбора прототипа конструкции на этапе технического проектирования насосного оборудования для объектов использования атомной энергии // Вестник ИрГТУ, 2016. № 9. С. 17–22.
4. Керниган Б., Ритчи Д. Язык программирования Си. 3-е изд.; пер. с англ. СПб.: Невский Диалект, 2001. 352 с.

References

1. Aristov A.I., Volkov P.N., Dubitskii L.G., Esin B.I., Levchenko P.G., Smirnov N.N. *Remontoprigradnost' mashin* [Machine maintainability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 368 p. (In Russian)
2. Vinogradova G.S., Markov A.V. *Otsenka i vybor komponovochnogo resheniya pri razrabotke oborudovaniya dlya ob'ektov ispol'zovaniya atomnoi energii s uchetom kompetentnosti privlekaemykh ekspertov* [Evaluation and selection of a layout arrangement when designing equipment for nuclear facilities taking into account the competence of the involved experts]. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and Life]. 2016, no. 2, pp. 5–10. (In Russian)

3. Vinogradova G.S., Markov A.V. *Algoritm vybora prototipa konstruksii na etape tekhnicheskogo proektirovaniya nasosnogo oborudovaniya dlya ob'ektov ispol'zovaniya atomnoi energii* [An algorithm of design prototype selection at the stage of engineering development of nuclear facility pumping equipment]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 9, pp. 17–22. (In Russian) DOI:10.21285/1814-3520-2016-9-17-22
4. Kernighan B., Ritchie D. *Yazyk programirovaniya Si*. [The C Programming Language]. St. Petersburg, Nevskii Dialekt Publ., 2001, 352 p.

Критерии авторства

Марков А.В., Виноградова Г.С., Денисенко А.И., Хлебников А.А. разработали концептуальную модель и требования к автоматизированной системе выбора компоновки сложных технических систем, провели обобщения, написали рукопись. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов. Авторы в равной степени ответственны за плагиат.

Authorship criteria

Markov A.V., Vinogradova G.S., Denisenko I.A., Khlebnikov A.A. have developed a conceptual model and requirements for the automated system of complex engineering system layout selection, summarized the information and wrote the manuscript. The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results. The authors are equally responsible for the plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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

Статья поступила 31.10.2016 г.

The article was received 31 October 2016