

**ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Е. И. Мартьянов¹, С. В. Карпушкин¹, В. В. Алексеев²

*Кафедры: «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (1),
martyanov@yandex.ru; «Информационные системы и защита информации» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: методика разработки системы; оптимизация; проблемно-ориентированная система; технически сложные системы.

Аннотация: Предложена методика разработки системы управления и оптимизации, применяемая при решении задач проектирования технически сложных систем. Разработанные на основе данной методики системы просты в применении и позволяют получать более точные оценки значений параметров технически сложных систем, чем при помощи традиционных методик, основанных на решении эмпирических уравнений. В качестве примера реализации предложенной методики рассмотрена проблемно-ориентированная система, предназначенная для оптимизации параметров двухлопастной мешалки вертикального емкостного аппарата.

Введение

К технически сложным системам (объектам) относят практически все технологическое оборудование, которое обладает сложным внутренним устройством и выполняет функции, заданные пользователем, на высокотехнологическом уровне, задействует различные энергоресурсы или преобразует их в другой вид энергии. Все эти изделия объединяет необходимость использовать при их проектировании сложные математические конструкции, предусматривающие решение систем дифференциальных уравнений с частными производными. Для промышленных предприятий данный подход недоступен, так как для его реализации требуется высококвалифицированный персонал и большие затраты времени, поэтому обычно применяется либо физический эксперимент в конкретной производственной ситуации, либо используют методики, основанные на решении эмпирических уравнений, разработанные головными организациями. Такой подход требует значительных затрат времени на разработку и внедрение, а также существенных материальных затрат и не всегда дает достоверные результаты. Например, достоверность результатов применения эмпирических методик определения конструктивных параметров и режимных характеристик механических мешалок вертикальных емкостных аппаратов, широко применяемых в химической и фармацевтической промышленности, часто сомнительна, так как методики основаны на результатах проведения физического эксперимента в конкретных условиях, изменения которых могут привести к ошибочным, а иногда к совершенно не достоверным результатам [1].

Более достоверные результаты можно получить с применением систем инженерного анализа: ANSYS, COMSOL, STAR-CD, QForm, NASTRAN или Fluent [2]. Однако применение данных интегрированных программных комплексов ограничено высокими требованиями к возможностям используемой компьютерной техники и требует высокой квалификации персонала. Эти комплексы ориентированы на решение широкого круга задач, но при этом необходимы настройки на рассматриваемую предметную область. Некорректные настройки могут привести к потерям в скорости вычисления и точности получаемых результатов. Поэтому актуальна разработка проблемно-ориентированных систем для расчета конструктивных параметров и режимных характеристик, позволяющих повысить скорость и увеличить точность вычислений за счет применения специализированных методов и алгоритмов реализации проектных расчетов рассматриваемой системы.

Постановка задачи

Разработка подобных интегрированных систем базируется на формулировке конкретной задачи [3]. Для большей наглядности рассмотрим задачу определения основных параметров двухлопастной мешалки для вертикального емкостного аппарата: при фиксированном диаметре D_t и высоте H_t аппарата необходимо найти диаметр мешалки D_m , высоту ее лопасти H_m , высоту установки над днищем аппарата H_{hm} и частоту вращения n , при которых суммарный вектор скорости потока жидкости достигает максимума при допустимых затратах мощности на перемешивание.

Конструктивные параметры мешалки D_m , H_m и H_{hm} являются определяющими для перемешивающего устройства, но их изменения не приводят к снижению технологичности изготовления аппарата в целом. При технических перевооружениях производств или переналадке оборудования изменения в конструкциях емкостных аппаратов чаще всего сводятся к подбору и изготовлению нового перемешивающего устройства. Определяющие размеры аппарата D_t и H_t , как правило, являются стандартизированными и определяются либо технологическими возможностями производства, либо стандартами. Частота вращения мешалки n оказывает наибольшее влияние на интенсивность перемешивания и, как следствие, на эффективность аппарата в целом. Интервалы допустимых значений варьируемых параметров:

$$D_m \in [0,1D_t, 0,9D_t]; \quad (1)$$

$$H_m \in [0,01D_m, 0,2D_m]; \quad (2)$$

$$H_{hm} \in [0,4D_m, 0,8H_t]; \quad (3)$$

$$n \in [0, 200]. \quad (4)$$

Для соблюдения норм и правил проектирования технологического оборудования вводится интервал (1) [3, 4]; (2) и (3) используются для ограничения линейных размеров перемешивающего устройства в соответствии с требованиями [5]; (4) также определяется требованиями [5].

Толщина лопасти мешалки S_m практически не оказывает влияния на процесс перемешивания и определяется по формуле

$$S_m = 0,1H_m. \quad (5)$$

Основным критерием оптимальности является суммарный вектор скорости перемещения перемешиваемой среды $K1$, который определяется как сумма всех векторов скорости в рассматриваемом объекте:

$$K1 = \sum_{i=1}^z \bar{u}_i, \quad (6)$$

где z – общее число узлов в расчетной модели; \bar{u}_i – вектор скорости в i -м узле расчетной модели.

Поскольку скорость перемешиваемой среды нельзя увеличивать бесконечно, в постановку задачи введено дополнительное ограничение на значение мощности, затрачиваемой на перемешивание, компенсирующее чрезмерный рост суммарного вектора скорости:

$$N = K_N \rho n^3 D_m^5 \leq N_{\max}, \quad (7)$$

где K_N – критерий мощности перемешивания [4 – 6]; ρ – плотность перемешиваемой среды.

Выбор языка программирования

Разработка системы оптимизации технического объекта предусматривает наличие математической модели его конструкции и режима функционирования, а также обоснование выбора языка программирования, на котором она будет реализована. Выбранный язык должен обладать достаточным набором функций и инструментов, чтобы реализовать весь требуемый функционал разрабатываемой системы. Помимо этого он должен обладать достаточным быстродействием и быть кроссплатформенным.

На данный момент существует множество языков программирования, пригодных для разработки данных систем. На основе рекомендаций [7] и имеющегося опыта [8, 9] рассмотрены следующие языки программирования: Python, Java, Ruby, PHP, C++ и Perl, так как они являются наиболее подходящими для решения подобных задач. В результате анализа и сравнения характеристик данных языков, принято решение использовать язык Python, который характеризуется следующими особенностями.

1. В языке программирования Python высокоуровневые типы данных, и их динамическая типизация короче, чем в программах на Java.

2. Несмотря на то что Perl и Python во многом схожи, Perl поддерживает общие прикладные задачи, такие как создание отчетов, сканирование файлов и т.д., а Python – общие методологии программирования, такие как проектирование структуры данных и объектно-ориентированное программирование.

3. В Python классы широко используются в стандартной библиотеке, в то время как PHP имеет стандартную библиотеку, полностью основанную на классах.

4. Python поддерживает основные структуры графического интерфейса пользователя (GUI).

5. По сравнению с Ruby, Python обладает большим набором структур данных, внутренних функций, лучшей обработкой пространства имен, использованием модулей и итераторов.

6. Python поддерживает множественное наследование, а Ruby – нет.

7. Код Python значительно короче, чем большинство других языков программирования, таких как C или C++.

Алгоритм работы системы

Алгоритм работы системы оптимизации параметров механической мешалки представлен в виде схемы на рис. 1.

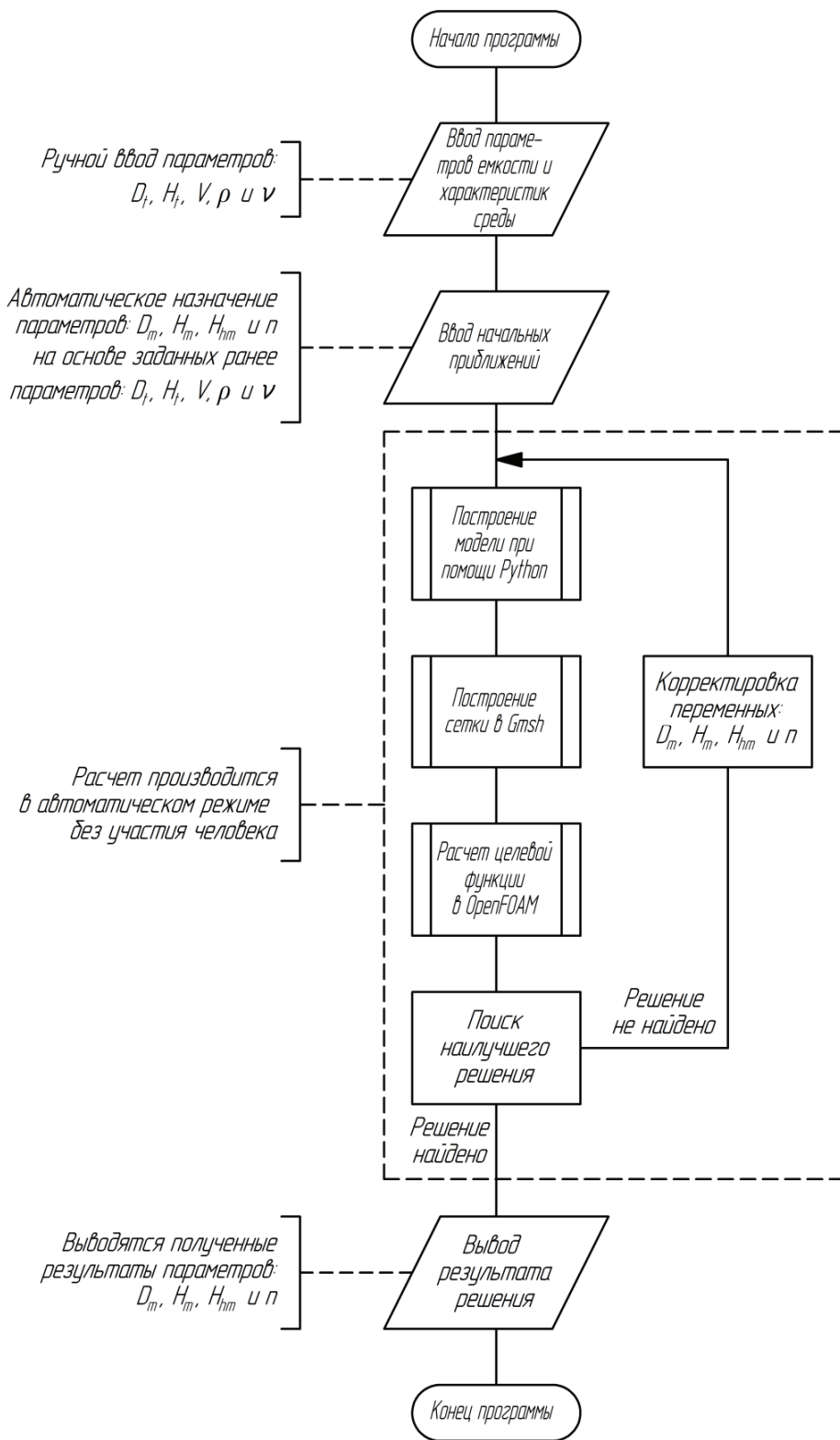


Рис. 1. Схема работы проблемно-ориентированной системы оптимизации

По окончании ввода значений фиксированных параметров: D_t , H_t , V (объем жидкости) и начальных значений варьируемых параметров: D_m , H_m , H_{hm} и n при помощи программных средств языка программирования Python строится 3D-модель рассматриваемого объекта. Данный процесс происходит в фоновом режиме и без участия оператора. Ввиду того, что не приходится использовать графический интерфейс и обрисовывать детали объекта, существенно снижаются требования к вычислительным ресурсам. Продолжительность построения модели не превышает нескольких секунд.

3D-модель и исходные данные передаются в программу Gmsh, где происходит генерация сетки конечных элементов (КЭ) по заданному алгоритму. Программа Gmsh – 3D-генератор конечных элементов с открытым исходным кодом – быстрый, легкий и удобный инструмент создания сетки КЭ с параметрическим вводом [9]. Он работает на языке программирования C++, но может использовать и Python. С его помощью можно формировать сетки любой конфигурации и сложности, как с применением встроенных алгоритмов, так и с помощью собственных. Так же как и Python, Gmsh не использует графический интерфейс и, следовательно, практически не расходует вычислительные ресурсы компьютера.

Параметры сформированной сетки передаются в программу OpenFOAM, где происходит расчет поля скоростей в аппарате. OpenFOAM – свободно распространяемый инструментальный вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). Он предназначен для реализации задач гидродинамики ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей, как несжимаемых, так и сжимаемых, с учетом конвективного теплообмена и действия сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES- и DNS-методов, также вероятно решение дозвуковых, околосзвуковых и сверхзвуковых задач. OpenFOAM позволяет выполнять и другие задачи:

- прочностные расчеты;
- задачи теплопроводности в твердом теле;
- многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока;
- задачи, связанные с деформацией расчетной сетки;
- задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии объекта.

В основе программы лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных, как стационарных, так и нестационарных. В терминах программы OpenFOAM большинство дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора – выбран пользователем в процессе расчета. Таким образом, полностью разделяются формирование расчетной сетки КЭ (метод дискретизации), дискретизация основных уравнений и их решение.

Для расчета целевых показателей в программе OpenFOAM использовалась разработанная ранее математическая модель [8]. Работа программы OpenFOAM осуществляется в фоновом режиме.

Поиск значений варьируемых параметров, соответствующих условному максимуму суммарного вектора скорости перемешиваемой среды, осуществлялся методом штрафных функций. Алгоритм метода реализован на языке программирования Python. Поиск проходил в фоновом режиме без участия оператора.

Анализ результатов исследования

Для проверки предложенного подхода проведено сравнение данных, полученных в ходе эксперимента, с данными, полученными при расчете в программных комплексах ANSYS и COMSOL, а также в разработанной программной системе.

Для расчетов использовался ПК со следующими характеристиками:

- процессор Intel Pentium 2020M (2.4 ГГц);
- оперативная память 8 ГБ DDR3 (800 МГц);
- видеокарта NVIDIA GeForce GT 720M 2 ГБ (DDR3);
- жесткий диск WD Blue 500 ГБ (5400 об/мин).

Полученные результаты сведены в табл. 1.

Как видно, применение программных интерактивных комплексов в разы сокращает затраты времени на получение результата. Указанное в строке «Данные эксперимента» время является фактически затраченным на каждый замер мощности с учетом проверки и переналадки оборудования. Суть эксперимента заключалась в определении потребляемой мощности электродвигателя косвенным методом – через замер тока на обмотке электродвигателя.

Таблица 1

Сравнение результатов расчетов

Параметр	Частота вращения мешалки, об/мин	Мощность, мВт	Отклонение по мощности от данных по эксперименту, %	Число элементов в модели	Время расчета (исследования), с	Отклонение по времени от расчета в разработанной программе, %
Данные эксперимента	20	0,35	–	–	54 000	~ +35 000
	40	2,47				
	60	8,10				
	80	19,30				
	100	38,50				
Расчеты в: ANSYS	20	0,32	–9	220 103	149	–2
	40	2,25	–10		137	+8
	60	7,74	–5		183	+30
	80	18,60	–4		224	+35
	100	36,90	–4		272	+47
COMSOL	20	0,28	–25	213 692	156	+3
	40	2,08	–18		168	+32
	60	7,12	–14		216	+53
	80	17,20	–12		252	+52
	100	35,10	–10		336	+82
разработанной программе	20	0,38	+9	210 401	152	–
	40	2,54	+3		127	
	60	7,89	–2		141	
	80	18,91	–2		166	
	100	36,96	–4		185	

Время, указанное в строках «Расчет в ANSYS» и «Расчет в COMSOL», дано без учета продолжительности построения модели и расчетной сетки, то есть время, затрачиваемое только на однократный расчет. Время, указанное в строке «Расчет в разработанной программе», учитывает весь цикл расчета без процесса оптимизации. В него также входит время, затрачиваемое на построение модели с последующей генерацией сетки и расчетом параметров.

Заключение

Доказана эффективность предложенного подхода к решению задач проектирования механических перемешивающих устройств. Предлагаемая проблемно-ориентированная программная система дает более точные результаты (отклонение от полученных экспериментальных данных не превышает 10 %) за более короткий промежуток времени (продолжительность расчета в некоторых случаях практически в 2 раза меньше чем у аналогичных программ).

Предложенный алгоритм разработки программной системы может быть применен к задачам проектирования других изделий, для математического описания которых используются системы дифференциальных уравнений с частными производными, например, задачам по определению:

- температурных полей рабочих поверхностей нагревательных плит вулканизационных гидравлических прессов;
- эффективности очистки газов в циклонах или скрубберах;
- продольного сечения балок металлических конструкций грузоподъемных сооружений и строительных металлических ферм;
- конструкции несущих элементов, располагающихся на открытом воздухе в различных климатических зонах, на которые воздействуют ветровые нагрузки или атмосферные осадки.

Подобный подход будет полезен для конструкторских и проектных отделов промышленных предприятий, где разрабатывают типовые изделия разной конфигурации и широкой номенклатуры или размерного ряда, а именно для предприятий химического машиностроения, тяжелого машиностроения, станкостроительных и приборостроительных заводов.

Список литературы

1. Мартьянов, Е. И. Применение систем автоматизированного расчета для проектирования лопастных мешалок / Е. И. Мартьянов, Е. Н. Малыгин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 14 – 16 ноября 2018 г., Тамбов. – Тамбов : Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Вып. 5, Т. 1. – С. 549 – 553.
2. Компьютерный инжиниринг : учеб. пособие / А. И. Боровков, В. С. Бурдаков, О. И. Клявин [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
3. Малыгин, Е. Н. Математические методы в технических расчетах : учеб. пособие / Е. Н. Малыгин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.
4. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
5. РД 26-01-90-85 Руководящий нормативный документ. Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. – Взамен РТМ 26-01-90-76 ; введ. 1986-01-01. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
6. Лацинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : справ. / А. А. Лацинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.

7. Хайнеман, Д. Алгоритмы. Справочник с примерами на C, C++, Java и Python : пер. с англ. / Д. Хайнеман, Г. Поллис, С. Селков. – 2-е изд. – СПб. : ООО «Альфа-книга», 2017. – 432 с.

8. Мартъянов, Е. И. Математическое описание полей скоростей в аппарате с мешалкой / Е. И. Мартъянов, Е. Н. Малыгин // Известия Санкт-Петербургского гос. технологического ин-та (техн. ун-та). – 2020. – № 54 (80). – С. 107 – 111.

9. Geuzaine, C. Gmsh: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities / C. Geuzaine, J.-F. Remacle // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – Vol. 79, Issue 11. – P. 1309 – 1331.

A Problem-Oriented System of Control and Optimization of Basic Parameters of Technical Complex Systems

E. I. Mart'yanov¹, S. V. Karpushkin¹, V. V. Alekseev²

*Departments of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (1),
martyanovei@gmail.com; Information Systems and Data Protection (2),
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: system development methodology; optimization; problem-oriented system; technically complex systems.

Abstract: The paper proposes a methodology for the development of a control and optimization system, which is used to solve the design problems of technical complex systems. The systems developed on the basis of this methodology are easy to use and create more accurate estimates of the values of the parameters of technical complex systems than using traditional methods based on solving empirical equations. An example of the implementation of the proposed methodology is a problem-oriented system designed to optimize the parameters of a two-blade mixer of a vertical capacitive apparatus.

References

1. Mart'yanov Ye.I., Malygin Ye.N. *Virtual'noye modelirovaniye, prototipirovaniye i promyshlennyy dizayn* [Virtual modeling, prototyping and industrial design], Proceedings of the V International scientific-practical conference, 14 - 16 November, 2018, Tambov, 2018, issue 5, vol. 1, pp. 549-553. (In Russ.)

2. Borovkov A.I., Burdakov V.S., Klyavin O.I. [et al.] *Komp'yuternyy inzhiniring: uchebnoye posobiye* [Computer engineering: a tutorial], St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2012, 93 p. (In Russ.)

3. Malygin Ye.N. *Matematicheskiye metody v tekhnicheskikh raschetakh: uchebnoye posobiye* [Mathematical methods in technical calculations: a tutorial], Tambov: Izdatel'stvo GOU VPO TGTU, 2010, 80 p. (In Russ.)

4. Braginskiy L.N., Begachev V.I., Barabash V.M. *Peremeshivaniye v zhidkikh sredakh. Fizicheskiye osnovy i inzhenernyye metody rascheta* [Stirring in liquid media. Physical foundations and engineering methods of calculation], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)

5. RD 26-01-90-85 *Rukovodyashchiy normativnyy dokument. Mekhanicheskoye peremeshivayushchiye ustroystva. Metod rascheta* [RD 26-01-90-85 Guiding normative document. Mechanical stirring devices. Calculation method], Leningrad: RTP LenNIIkhimmasha, 1985, 257 p. (In Russ.)

6. Lashchinskiy A.A., Tolchinskiy A.R. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoy apparatury: spravochnik* [Fundamentals of design and calculation of chemical equipment: a reference book], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1970, 752 p. (In Russ.)

7. Khayneman D., Pollis G., Selkov S. *Algoritmy. Spravochnik s primerami na C, C++, Java i Python* [Algorithms. Reference with examples in C, C++, Java and Python], St. Petersburg: OOO "Al'fa-kniga", 2017, 432 p. (In Russ.)

8. Mart'yanov Ye.I., Malygin Ye.N. [Mathematical description of velocity fields in an apparatus with a stirrer], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2020, no. 54 (80), pp. 107-111. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Geuzaine C., Remacle J.-F. Gmsh: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-Processing Facilities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2009, vol. 79, issue 11, pp. 1309-1331.

Problemorientiertes Steuerungs- und Optimierungssystem der wichtigsten Parameter von technisch komplexen Systemen

Zusammenfassung: Es ist die Methodik zur Entwicklung des Steuerungs- und Optimierungssystems vorgeschlagen, die zur Lösung von Entwurfsproblemen technisch komplexer Systeme verwendet wird. Die auf der Grundlage dieser Technik entwickelten Systeme sind einfach zu bedienen und ermöglichen genauere Schätzungen der Parameterwerte technisch komplexer Systeme als mit herkömmlichen Methoden, die auf der Lösung empirischer Gleichungen basieren. Als Beispiel für die Umsetzung der vorgeschlagenen Methodik wird ein problemorientiertes System betrachtet, entworfen zur Optimierung der Parameter des Zweiflügelmischers der vertikalen Behälterapparatur.

Système de la gestion et de l'optimisation axé sur les problèmes des principaux paramètres des systèmes techniques complexes

Résumé: Est proposée la méthode de la mise au point du système de la gestion et de l'exploitation utilisé pour résoudre les problèmes de la conception des systèmes techniques complexes. Les systèmes mis au point à partir de cette méthode sont faciles à utiliser et permettent d'obtenir des estimations plus précises des valeurs des paramètres des systèmes techniques complexes en comparaison avec les méthodes traditionnelles basées sur la résolution des équations empiriques. À titre d'exemple de la mise en œuvre de la méthode proposée est considérée un système axé sur les problèmes qui est conçu pour optimiser les paramètres de l'agitateur à deux pales de l'appareil capacitif vertical.

Авторы: *Мартьянов Евгений Игоревич* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Карнушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Алексеев Владимир Витальевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Зайцев Александр Владимирович* – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГКВУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» МО РФ, г. Балашиха, Московская обл., Россия.