

УДК: 658.512.26

DOI: [10.26102/2310-6018/2019.27.4.043](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.043)

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ САД-МОДЕЛЕЙ С РЕШЕТЧАТОЙ СТРУКТУРОЙ

Н.В. Ципина¹, О.Н. Чирков², С.А. Слинчук³, И.В. Чепрасов⁴, В.А. Мадесов⁵

ФГБОУ ВО «Воронежский Государственный технический университет»,
Воронеж, Российская Федерация

¹e-mail: tcnv@mail.ru

²e-mail: chir_oleg@mail.ru

³e-mail: sslinchuk@gmail.com

⁴e-mail: leoric16@mail.ru

⁵e-mail: madesoff@mail.ru

Резюме: В данной статье рассмотрен полный этап разработки удобного и простого метода конструирования решетчатых деталей на производстве. Цель исследования состоит в наблюдении, анализе и решении проблем при проектировании САД-моделей с решетчатой структурой. В работе оценена производительность современных инструментов систем автоматизированного проектирования (САПР), предложен эффективный метод проектирования решетчатых конструкций. Основная идея заключается в замене САД-модели с решетчатой структурой на твердотельные САД-модели, обладающие одинаковыми механическими свойствами. Применение таких эквивалентных материалов дает существенный выигрыш в эффективности проектирования. Предлагаемый метод позволяет конструкторам выбрать правильную решетчатую структуру и её плотность. Указаны недостатки и положительные стороны разработанного метода. В сочетании с методом конечных элементов, предложенный подход проектирования САД-моделей сокращает время моделирования решетчатых конструкций. Оценена производительность современных инструментов систем автоматизированного проектирования в контексте требований аддитивного производства. Результаты показывают, что современные САПР не позволяют легко и быстро проектировать решетчатые структуры для аддитивного производства. Также остается актуальной необходимость развития современного программного обеспечения САЕ для проведения анализа методом конечных элементов на 3D-моделях решетчатой структуры.

Ключевые слова: решетчатая структура, эквивалентный материал, метод конечных элементов.

Для цитирования: Ципина Н.В., Чирков О.Н., Слинчук С.А., Чепрасов И.В., Мадесов В.А. Эффективный метод проектирования САД-моделей с решетчатой структурой. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(4). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/ZipinaSoavtors_4_19_2.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.043

EFFECTIVE METHOD OF DESIGNING CAD MODELS WITH LATTICE STRUCTURE

N.V. Tsipina¹, O.N. Chirkov², S.A. Slinchuk³, I.V. Cheprasov⁴, V.A. Madesov⁵
FGBOU VO «Voronezh State Technical University», Voronezh, Russia

Abstract: This article shows how important it is to develop a convenient and simple method for designing lattice parts in production. The purpose of the entire experiment is to observe, analyze and solve problems in the design of lattice structures. The performance of modern tools of computer-aided design (CAD) systems was also evaluated. All the disadvantages and positive aspects of the developed method are indicated. The considered design method allows designers to choose the right lattice structure and its density. An essential part of this proposal is the use of equivalent lattice materials. This approach eliminates the need to design lattice-based CAD models and shortens the simulation time for

FEMs. This methodology may be applicable in determining equivalent materials for other lattice structures. Equivalent materials also reduce FEM simulation time. The performance of modern tools of computer-aided design systems was evaluated to determine whether they adequately meet the requirements of additive manufacturing. The results show that modern CAD systems do not allow you to easily and quickly design lattice structures for additive manufacturing. It is necessary to develop modern CAE software to conduct finite element method analysis on a 3D lattice model.

Keywords: lattice structure, CAD software, finite element method (FEM).

For citation: Tsipina N.V., Chirkov O.N., Slinchuk S.A., Cheprasov I.V., Effective method of designing CAD models with lattice structure. *Modeling, optimization and information technology*. 2019;7(4). Available by: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/11/ZipinaSoavtors_4_19_2.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2019.27.4.043(In Russ.).

Введение

В настоящее время, не смотря все преимущества решетчатых структур, инженеры не обладают полной информацией для свободного и правильного интегрирования их в конструкцию детали. Нехватка данных и методов проектирования усложняет выбор наиболее подходящих конфигураций решетчатых структур, не говоря уже об отсутствии соответствующих инструментов для оценки разработанных деталей. Открытыми остаются вопросы выбора типа и плотности решетчатой структуры, соответствия выбранной конфигурации установленным требованиям.

В ранее проведенных исследованиях выяснилось, что большая площадь поверхности, используемая при моделировании решетчатых структур, приводит к длительным процессам в программном обеспечении CAD и CAE[1]. Также современное программное обеспечение САПР не способно легко и быстро проектировать решетчатые конструкции[2]. Рассмотренные факторы повлияли на решение предложить метод проектирования решетчатых конструкций, позволяющий полностью избежать необходимости создавать CAD-модели решетчатой конструкции на основе объемов и поверхностей, то есть перейти к эквивалентным материалам.



Рисунок 1 – Метод проектирования решетчатой конструкции на основе использования эквивалентного материала

Figure 1 – Method for designing a lattice structure based on the use of equivalent material

Материалы и методы

Введем понятие области расчёта – это определенный объем, который ограничивает разрешенную область симуляции. Она определяется необходимыми размерами для моделируемой детали. Решетчатая структура должна быть рассчитана в пределах этого объема.

Пусть относительная плотность – это отношение объема материала решетчатой структуры к объему области ограничения. Выражение 1 и Рисунок 2 описывают относительную плотность.

$$\rho_{отн.} = \frac{V_{р.с.}}{V_{о.о.}}, \quad (1)$$

где $\rho_{отн.}$ – относительная плотность;
 $V_{р.с.}$ – объём решетчатой структуры;
 $V_{о.о.}$ – объём области ограничения.

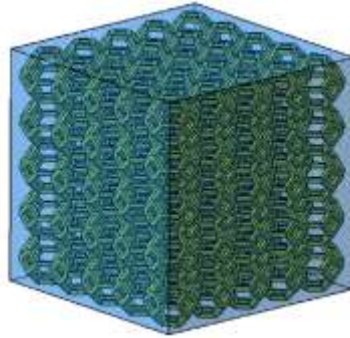


Рисунок 2 – Область ограничения (синяя) и решетчатая структура (желтая)
 Figure 2 – Area of restriction (blue) and lattice structure (yellow)

Твердый материал представляет собой объем, соответствующий области ограничения решетчатой структуры, заполненной плотным материалом. Любой твердый материал имеет механические свойства.

Эквивалентный материал представляет собой объем, соответствующий области ограничения решетчатой структуры, заполненный плотным материалом, механические свойства которого аналогичны механическим свойствам решетчатой структуры.

Предложенный метод

Цель данного метода заключается в том, чтобы конструктор обладал полной информацией, необходимой для того, чтобы узнать, какую конфигурацию решетчатой структуры использовать в конструкциях создаваемых деталей. Предлагаемый метод проектирования основан на использовании эквивалентного материала для поиска и выбора наиболее подходящей решетчатой структуры, которая соответствует требованиям к деталям в области проектирования и учитывает функциональные поверхности. При использовании эквивалентного материала результатом метода проектирования являются деление на ячейки и выбор материала детали, а также выбор относительной плотности для каждой ячейки.

Таким образом, основная идея рассматриваемой стратегии проектирования решетчатой конструкции состоит в замене и представлении САД-модели решетчатой конструкции эквивалентным материалом. Такой материал сплошной и не содержит никаких решеток, поэтому имеет только несколько поверхностей. Из-за небольшого количества задействованных поверхностей для материала, с эквивалентной решетчатой структурой, заметно упростится анализ методом конечных элементов (МКЭ).

Тогда основная проблема предлагаемого способа заключается в определении связи между решетчатой структурой, твердым материалом и эквивалентным материалом. Для связи механических свойств решетчатой структуры и эквивалентного материала используются две концепции: относительный модуль Юнга и относительная прочность [3]. Относительный модуль Юнга будет использоваться для оценки деформации структуры решетки. Относительная прочность будет определять

эквивалентное растягивающее напряжение (в нашем случае напряжение Мизеса) структуры решетки.

На рисунке 3 показан пример представленной концепции. Чтобы определить соответствующие характеристики эквивалентного материала для различных решетчатых структур и различных материалов, необходимо установить для каждого типа решетчатой структуры соотношение между относительной плотностью структуры решетки и относительным модулем Юнга, а также соотношение между относительной плотностью и относительной силой.

В примере, представленном на Рисунке 3, относительный модуль Юнга решетчатой структуры равен 0,06 (6 ГПа / 100 ГПа), а относительная прочность равна 0,05 (50 МПа / 1000 МПа). Эти два параметра позволяют определить эквивалентный материал, модуль Юнга которого будет равен $0,06 \times 100 \text{ ГПа} = 6 \text{ ГПа}$, а предел текучести будет равен $0,05 \times 800 \text{ МПа} = 40 \text{ МПа}$. Предлагаемый способ не учитывает концентрацию напряжений.

Таким образом, мы определяем относительный модуль Юнга как отношение модуля Юнга решетчатой структуры к модулю Юнга твердого материала. Модуль Юнга эквивалентного материала такой же, как модуль Юнга решетчатой структуры. Для данной нагрузки относительная прочность - это отношение между напряжением Мизеса твердого материала и напряжением Мизеса решетчатой структуры. Следовательно, относительная прочность также является отношением между пределом текучести эквивалентного материала и пределом текучести твердого материала. Уравнения 2, 3 и 4 суммируют эти соотношения.

$$E_{отн.} = \frac{E_{р.с.}}{E_{т.м.}}, \quad (2)$$

где $E_{отн.}$ – относительный модуль Юнга; $E_{р.с.}$ – модуль Юнга решетчатой структуры;
 $E_{т.м.}$ – модуль Юнга твердого материала.

$$\sigma_{отн.} = \frac{\sigma_{т.м.}}{\sigma_{р.с.}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{отн.}$ – относительное напряжение по фон Мизесу;
 $\sigma_{т.м.}$ – напряжение по фон Мизесу твердого материала;
 $\sigma_{р.с.}$ – напряжение по фон Мизесу решетчатой структуры.

$$\sigma_{0\text{ отн.}} = \frac{\sigma_{тэ.м.}}{\sigma_{тт.м.}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{0\text{ отн.}}$ – относительный предел прочности;
 $\sigma_{тэ.м.}$ – предел текучести эквивалентного материала;
 $\sigma_{тт.м.}$ – предел текучести твердого материала.

Также известно, что:

$$E_{р.с.} = E_{э.м.}, \quad (5)$$

$$\sigma_{тт.м.} = \sigma_{тр.с.}. \quad (6)$$

Началомлюбого метода является ввод данных, представляющий собой определение области расчёта и требования к деталям. В нашем способе основные требования – это приложенная сила, коэффициент безопасности и максимальная деформация. Коэффициент безопасности – это термин, описывающий несущую способность системы за пределами ожидаемых или фактических нагрузок. Он учитывает чрезвычайные ситуации, неожиданные нагрузки или неправильное использование. Коэффициент безопасности, используемый в этой работе, определяется как:

$$S = \frac{\sigma_{макс. д.}}{\sigma_{макс. п.}}, \quad (7)$$

где S – коэффициент безопасности;
 $\sigma_{макс. д.}$ – максимальное допустимое напряжение;
 $\sigma_{макс. п.}$ – максимальное приложенное напряжение.

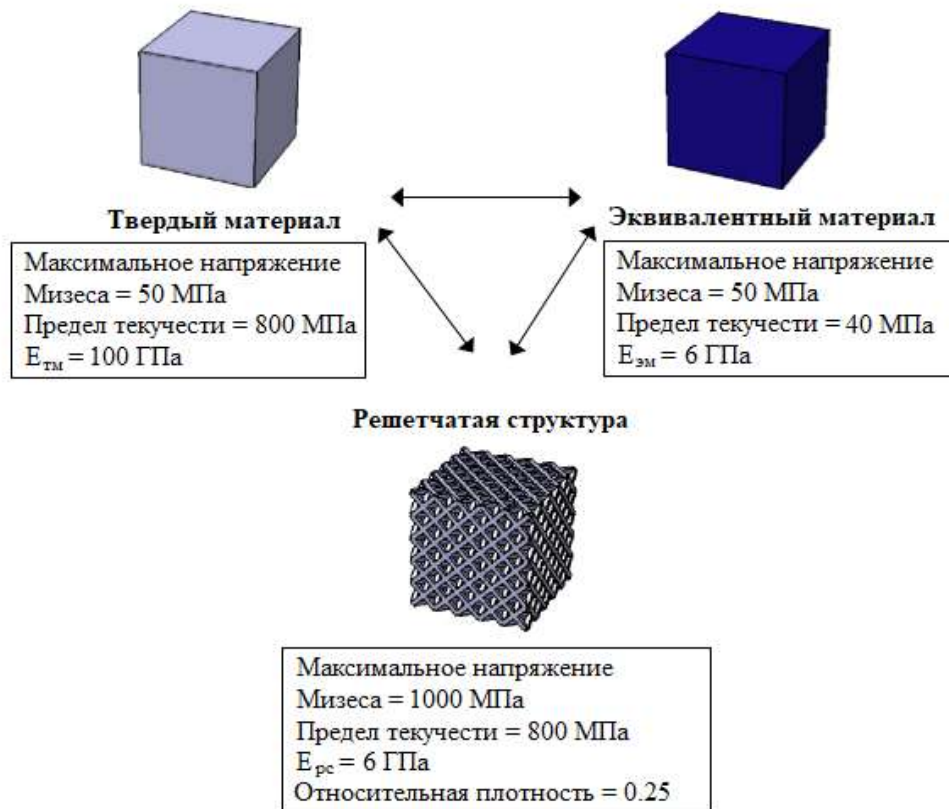


Рисунок 3 – Связь между решетчатой структурой, твердым материалом и эквивалентным материалом
 Figure 3 – The relationship between the lattice structure, solid material and equivalent material

Результаты и обсуждения

Шаг 1. На первом этапе инженер создает трехмерную модель САПР со сплошным материалом в расчётной области. Затем добавляются граничные условия детали и выполняется моделирование МКЭ. Распределение напряжений по Фон Мизесу и распределение смещений являются показателями, помогающими выбрать наиболее подходящий тип решетчатой структуры и относительную плотность на втором этапе.

Шаг 2. На втором шаге разделяем модель. Разделы – это разбиение детали на разные зоны. Они определяются на основе распределения смещений и распределения напряжений Мизеса, полученных на первом этапе. Каждый раздел может иметь разные относительные плотности.

После того, как определили разделы, следующий этап состоит из двух частей: сначала выберите наиболее подходящий тип решетчатой структуры для каждого раздела, затем относительную плотность, которая удовлетворяет требованиям каждой разделенной части модели.

Чтобы выбрать наиболее тип решетчатой структуры и угловую нагрузку, необходимо оценить относительный модуль Юнга каждого раздела. Он может быть получен путем деления максимального смещения, рассчитанного на первом этапе для раздела модели, на максимальную деформацию, определенную в требованиях. Затем,

используя сравнение относительного модуля Юнга в зависимости от различной решетчатой структуры, можно сделать выбор (Рисунок 4, шаг 2, секция А).

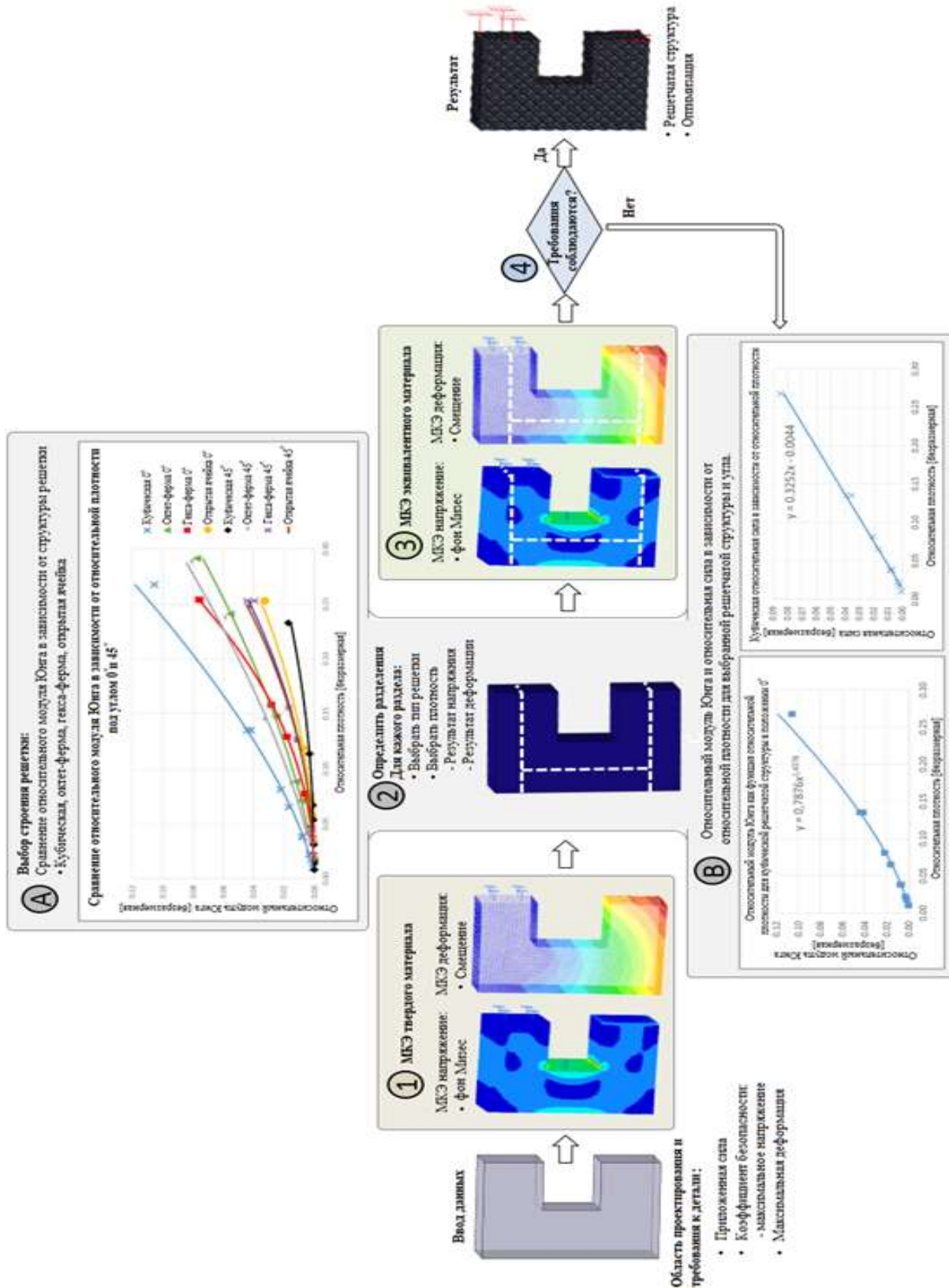


Рисунок 4 – Пошаговая разработка нового метода проектирования решетчатых конструкций

Figure 4 – Step-by-step development of a new method for designing lattice structures

Основываясь на максимальном смещении и максимальном напряжении Мизеса МКЭ, полученном на первом этапе для каждого раздела, можно определить относительную плотность. Она зависит от относительного модуля Юнга и относительной прочности раздела. Относительная прочность раздела может быть получена путем деления максимального напряжения Фон Мизеса, рассчитанного на первом этапе для раздела, на предел текучести материала, деленный на коэффициент безопасности, определенный в требованиях. Относительный модуль Юнга и относительная прочность дают две относительные плотности, использующиеся на Рисунке 4 (шаг 2, секция В). Выбрана относительная плотность, которая обеспечивает как относительный модуль Юнга, так и относительную прочность. Эти параметры определяют эквивалентный материал, используемый на шаге 3.

Шаг 3. На третьем этапе выполняется МКЭ с эквивалентным материалом, определенным на втором шаге. Для каждого раздела определяются максимальное смещение и максимальное напряжение Фон Мизеса.

Шаг 4. Исходя из результатов МКЭ, полученных на третьем шаге, максимальные смещения и максимальное напряжение Фон Мизеса проверяются в каждом разделе, чтобы увидеть, соответствуют ли они требованиям к детали. Для анализа распределения напряжений фон Мизеса и сравнения значений с требованиями возможны два пути. Разделите значения каждого напряжения Фон Мизеса на относительную прочность и сравните их с пределом текучести твердого материала или сравните каждое напряжение Фон Мизеса с пределом текучести эквивалентного материала.

Если проверка в разделе не соответствует требованиям, то раздел обновляется и улучшается. Второй и третий этапы повторяются. И весь этот цикл повторяется для оптимизации и проверки наиболее подходящей плотности в каждом разделе.

Выходные данные стратегии проектирования направлены на создание CAD-модели с решетчатой структурой на основе выбранного материала, разделов, структуры решетки и плотности [4]. Следующим шагом развития является оптимизация решетчатых стоек, для снижения пагубных концентрации напряжений [5].

Заключение

Предложенный метод проектирования позволяет выбрать правильную решетчатую структуру и ее плотность. Его отличительная особенность – использование эквивалентных материалов решетчатой структуры. Такой подход устраняет необходимость проектирования CAD-моделей с решетчатой структурой, заменив их на твердотельные CAD-модели с одинаковыми механическими свойствами, что и сокращает время моделирования МКЭ по методу конечных элементов.

Также представлена методология создания эквивалентного материала. Она позволяет заменить CAD-модели с решетчатой структурой на твердотельные CAD-модели, которые имеют одинаковые механические свойства. Эта методология может быть использована для определения эквивалентных материалов и для других решетчатых структур. Эквивалентные материалы сокращают время моделирования МКЭ.

Оценена производительность современных инструментов САПР, чтобы определить, достаточно ли они соответствуют требованиям аддитивного производства. Результаты показывают, что современные САПР не позволяют легко и быстро проектировать решетчатые структуры для аддитивного производства. Необходимо развивать современное программное обеспечение САЕ для проведения анализа МКЭ на

3D модели решетчатой структуры [6]. Одним из направлений оптимизации можно выбрать взвешенную оценку характеристик [7] или итеративную методику [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. *Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products*. Stahl und Eisen. 2005.
2. Шабров Н.Н. Реальные достижения виртуальной реальности. *Rational Enterprise Management*. 2011;2:46–48.
3. Louvis E. Selective laser melting of aluminum components. *Journal of Materials Processing Technology. Department of Engineering, The University of Liverpool*. 1 February 2011;211(2):275–284.
4. Иванов С.В., Хорошилов В.Н., Ципина Н.В. Методы тестирования и испытаний в системе качества ISO 9000. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2004;4(4):41–48.
5. Ципина Н.В., Хараджиди Д.А. Комплексное моделирование и оптимизация конструкций в процессеквзного проектирования. *Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем Межвузовский сборник научных трудов*. Воронеж. 2016:8–16.
6. Макаров О.Ю., Турецкий А.В., Ципина Н.В., Шуваев В.А. Комплексное моделирование и оптимизация характеристик в процессе конструкторского проектирования радиоэлектронных средств. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015;11(6):100–104.
7. Чирков О.Н. Математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(4):49–54.
8. Чирков О.Н., Кузнецова А.О. Итеративная методика помехоустойчивого приема QAM-сигналов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(4):84–88.
9. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Слинчук С.А. Применение методов полуопределенного программирования для решения задачи повышения помехоустойчивости систем OFDM связи. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(5):95–100.

REFERENCES

1. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. *Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products*. Stahl und Eisen. 2005.
2. Shabrov N.N. Real Achievements of Virtual Reality. *Rational Enterprise Management*. 2011;2: 46–48.
3. Louvis E. Selective laser melting of aluminum components. *Journal of Materials Processing Technology. Department of Engineering, The University of Liverpool*. 1 February 2011;211(2):275–284.
4. Ivanov S.V., Khoroshilov V.N., Tshipina N.V. Testing and testing methods in the quality system ISO 9000. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2004;4(4):41–48.
5. Tshipina N.V., Harajidi D.A. Integrated modeling and optimization of structures in the process of end-to-end design. *Problems of ensuring the reliability and quality of instruments, devices and systems Interuniversity collection of scientific papers*. Voronezh. 2016:8–16.

6. Makarov O.Yu., Turetsky A.V., Tsipina N.V., Shuvaev V.A. Integrated modeling and optimization of characteristics in the design process of electronic equipment. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2015;11(6):100–104.
7. Chirkov O.N. The mathematical model of a weighted estimate of the radio channel for multi-antenna OFDM systems. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(4):49–54.
8. Chirkov O.N., Kuznetsova A.O. An iterative technique for noise-immunity reception of QAM signals. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(4):84–88.
9. Chirkov O.N., Romashenko M.A., Slinchuk S.A. Application of semidefinite programming methods to solve the problem of increasing the noise immunity of OFDM communication systems. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(4):95–100.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATIONS ABOUT AUTHORS

Ципина Наталья Викторовна, канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0001-5688-355X](https://orcid.org/0000-0001-5688-355X)

Natalya V. Tsipina, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Чирков Олег Николаевич, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0003-2250-2100](https://orcid.org/0000-0003-2250-2100)

Oleg N. Chirkov, Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Слинчук Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0002-2261-7699](https://orcid.org/0000-0002-2261-7699)

Svetlana A. Slinchuk, Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Чепрасов Игорь Викторович, студент Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

ORCID: [0000-0003-1108-9381](https://orcid.org/0000-0003-1108-9381)

Igor V. Cheprasov, student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Мадесов Владислав Андреевич, студент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

Vladislav A. Madesov, student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.