

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

DOI: 10.25987/VSTU.2020.89.98.010

УДК 658.5.011

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ТИПА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

П.А. Аркин, Н.В. Муханова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

С.Д. Русалевич

Общество с ограниченной ответственностью «ЛПМ-Комплекс»
Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, дом 30.

Введение. Данная статья посвящена решению задачи выбора оборудования для быстрого прототипирования объектов, на основе метода анализа иерархий. Данная задача актуальна, так как с ее помощью возможно подобрать оборудование, исходя из предпочтений заказчика, притом не требуя от него погружения в информационную область предмета. Известно, что на современном рынке присутствует огромное количество различных технологий, позволяющих создать модель изделия без использования пресс форм, только за счет 3D-модели, потому необходимо иметь сводное представление о доступности всех этих методов.

Данные и методы. Использована математическая модель, описывающая процесс выбора приоритетов среди альтернатив в упрощенном виде с целью облегчения процесса обработки данных. Основными критериями выбраны: скорость печати, точность печати, максимальный размер готового изделия, поддержка нескольких цветов при печати и стоимость оборудования. Для решения задачи также выбраны альтернативы среди технологий печати: FDM, DLP, CJP, MJM. Оценки по критериям и альтернативам были получены путем опроса эксперта, с последующей обработкой данных.

Полученные результаты. Апробация использованной модели и алгоритмов производилась на производственных предприятиях, занимающихся быстрым прототипированием и различающихся сложностью изготавливаемых изделий. FDM оборудование при заданных параметрах является наиболее приоритетными при мелкосерийном производстве. В качестве прямых альтернатив стоит рассматривать DLP и MJM.

Заключение. Используемая в работе модель позволяет эффективнее организовать выбор и закупку оборудования для быстрого прототипирования и сделать процесс принятия решений более гибким и оперативным.

Ключевые слова: быстрое прототипирование, метод анализа иерархий, 3D-печать, компетенция эксперта.

Для цитирования:

Сведения об авторах:

Павел Александрович Аркин (д-р экон. наук, профессор, arkin1969@mail.ru), профессор кафедры «Процессы управления наукоемкими производствами»

Наталья Викторовна Муханова (канд. экон. наук, доцент, nmukhanova@spbstu.ru), доцент Института промышленного менеджмента, экономики и торговли

Святослав Дмитриевич Русалевич (sla9620@yandex.ru), инженер ООО «ЛПМ-Комплекс»

Oh authors:

Pavel A. Arkin (Doctor of Economics, Professor, arkin1969@mail.ru), Professor of the Department "Processes for High-Tech Production Management"

Natalya V. Mukhanova (PhD in Economics, Associate Professor, nmukhanova@spbstu.ru), Associate Professor at the Institute of Industrial Management, Economics and Trade

Rusalevich D. Svyatoslav (sla9620@yandex.ru), engineer of LLC "LPM-Complex"

Аркин П.А., Муханова Н.В., Русалевич С.Д. Решение задачи выбора типа оборудования для быстрого прототипирования // Организатор производства. 2020. Т.28. № 2. С. 108-117. DOI: 10.25987/VSTU.2020.89.98.010

SOLUTION OF THE PROBLEM OF EQUIPMENT TYPE SELECTION FOR QUICK PROTOTYPING

P.A. Arkin, N.V. Mukhanova

*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnic St., 29*

S.D. Rusalevich

*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
Russia, 195251, St. Petersburg, Polytechnic St., 29*

Introduction. *This article is devoted to solve the problem of choosing equipment for rapid prototyping of objects, based on the method of hierarchy analysis. This task is relevant, since with its help is possible to select equipment based on the preferences of the customer, without requiring him to dive into the information area of the subject. It is known that there is a huge number of different technologies that allow you to create a product, without using molds, only due to the 3D model, therefore it is necessary to have a consolidated idea of the availability of all these methods in the modern market.*

Data and methods. *A mathematical model is used to describes the process of choosing priorities among alternatives in a simplified form in order to facilitate data processing. The main criteria are: print speed, print accuracy, maximum size of the finished product, support for multiple colors when printing, and the cost of equipment. To solve the problem, alternatives were also chosen among printing technologies: FDM, DLP, CJP, MJM. Estimates for criteria and alternatives were obtained by interviewing an expert, followed by data processing.*

The received results. *Tests of the used model and algorithms was carried out at the manufacturing enterprises engaged in rapid prototyping and differing in the complexity of manufactured products. FDM equipment with given parameters is the highest priority for small-scale production. Direct alternatives are DLP and MJM.*

Conclusion. *The model can be used to make decisions more efficiently organize the selection and procurement of equipment for rapid prototyping, and make the decision-making process more flexible and efficient.*

Key words: *rapid prototyping, hierarchy analysis method, 3D printing, expert competence.*

For citation:

P.A. Arkin, N.V. Mukhanova, S.D. Rusalevich. The solution to the problem of choosing the type of equipment for rapid prototyping // Production Organizer. 2020. Т. 28. № 2. P. 108-117. DOI: 10.25987/VSTU.2020.89.98.010

Введение

Быстрое прототипирование – отрасль производства, развивающаяся более 40 лет, направленная на создание детали (конструкции, макета, формы, и т.д.) в максимально сжатый срок, согласно требуемым параметрам. Данная тема наиболее актуальна в наши дни, так как мы живем в эпоху четвертой индустриальной революции, когда производство основывается не на месте наличия ресурсов, а стремится оказаться как можно ближе к потребителю. Поэтому с помощью упрощения и удешевления механизмов

создания макетов, соотносящихся с требованиями заказчика, появилась такой широкий выбор среди способов быстрого прототипирования.

Целью данной работы является определить наиболее приемлемое оборудование для создания прототипа изделия, согласно заданным параметрам.

Задачами являются сравнить известные распространённые способы быстрого прототипирования, используемые в производстве по выбранным критериям.

Объектом исследования является область по оказанию услуг потребителям, связанная с разработкой и созданием изделий, отвечающим заданным параметрам, в краткие сроки, либо изделиям, которые невозможно создать при помощи традиционных методов изготовления.

Теория

По сравнению с субтрактивными технологиями, аддитивные позволяют сократить время от процесса разработки прототипа до выпуска готового образца до 1 дня. Быстрое прототипирование названо именно таким образом, из-за процесса, который эта технология должна была заменить или улучшить. Раньше производители и потребители не всегда могли позволить себе затратить время и ресурсы на создание единичного экземпляра изделия, что тормозило процесс разработки и внедрения нововведений. Однако с появлением ЧПУ машин, способных в кратчайшие сроки изготовить сложносоставленную модель, чья геометрия зависит только от воображения создателя, термин распространился на всю область 3-D печати.

От самых первых грубых и громоздких конструкций, работающих по принципу FDM, эта область производства широко развивается, поставив все более высокоточные машины, способные создавать изделия не превышающие нескольких миллиметров. Рассмотрим наиболее распространенные методы, которыми пользуются современные 3-D принтеры, позволяющие из полуфабрикатов создавать изделия [1]:

- ✓ Цифровая светодиодная проекция (DLP).
- ✓ Лазерная стереолитография (SLA или STL)
- ✓ Масочная стереолитография (SGC)
- ✓ Послойное наплавление (FDM)
- ✓ Выборочное лазерное спекание (SLS)
- ✓ Изготовление объектов методом ламинирования (SDL или LOM)
- ✓ Технология многоструйного моделирования (MJM)
- ✓ Струйная трехмерная печать (3DP или SJP)
- ✓ Выборочная лазерная плавка (SLM или DMLS)

Как видно из представленных выше данных [2], способов создать прототип достаточно много и для того, чтобы подобрать наиболее эффективный для предприятия, эксперту [3] необходимо учитывать как специфику заказа и его конечную стоимость, так и другие критерии. В данной

работе рассмотрен список тех качеств и альтернатив, которые наиболее подходят к мелкосерийному производству со сжатым бюджетом, направленному на производство деталей для FDM оборудования собственной разработки [4]. Кроме того, для эксперта не важны такие параметры, как габариты оборудования и тип пластика, с которым оно может работать. Первый фактор диктуется тем, что оборудование будет размещено на территории предприятия, обладающего огромными цеховыми помещениями. Второй же критерий обусловлен тем, что допустимая погрешность при печати тех или иных деталей согласно ТУ предприятия составляет $\pm 0,2$ мм, вне зависимости от типа пластика, и в подобные рамки отклонений подпадает всё оборудование аддитивного производства.

Таким образом, список критериев представлен следующими параметрами:

✓ Sp (Speed) – скорость изготовления готовой мастер-модели при должном качестве, в единицу времени.

✓ Ac (Accuracy) – измеряемая величина отклонений в размерах готового изделия от цифровой модели.

✓ Ma (Max size) – максимально возможные габариты готового изделия в 3-х измерениях. Хотя в условиях задачи взята крайне малая модель для более быстрого подтверждения результатов, данный параметр, зачастую, является наиболее влияющим на выбор оборудования.

✓ h (Chromaticity) – способность или неспособность оборудования изготавливать изделия более чем 1 цветом.

✓ Co (Cost) – стоимость оборудования с необходимыми расходными материалами.

Разумеется, могут быть выбраны и другие либо дополнительные параметры, однако их количество не должно превышать 7-8 пунктов. В противном случае это увеличит трудозатраты на обработку итоговых данных.

Далее необходимо выбрать альтернативы среди существующих методов быстрого прототипирования. Для визуального отображения конкурентных преимуществ каждого из них, в работе будут рассмотрены только те методы, которые в достаточной мере отличаются по своей структуре и технологическому назначению. Также следует учитывать, что целью работы является не поиск конкретного вида оборудования, а метода, с помощью которого реализуется аддитивное производство, так как

именно специфика создания прототипа влияет на конечную стоимость оборудования.

Таким образом, список альтернатив представлен следующими параметрами:

- B1 - FDM (Fused Deposition Modelling) – технология [5], в которой изготовление объекта происходит за счет послойного наплавления филамента на рабочую поверхность, с помощью движения блока экструдера по осям XYZ, через который подается нить пластика, нагретая до температуры плавления. Самая распространенная технология в наше время. Стоимость оборудования начинается от 200\$, расходный материал стоит меньше 10\$. Широкий спектр применения от хобби, до промышленных деталей [6]. К недостаткам можно отнести низкую точность печати и часто возникающие проблемы с оборудованием. Кроме того, необходимость в создании поддерживающих структур при создании объёмной модели, вынуждают перерасходовать пластик. Кроме того детали, выполненные с помощью поддерживающих структур, требуют дополнительную механообработку, что в общем итоге отрицательно сказывается на общем качестве изделия.

- B2 - DLP (Digital Light Processing) – [7] технология, использующая принцип затвердевания веществ под лучами ультрафиолета. Простыми словами, в ванну с УФ лампой заливается полимерная смола, и при включении определённых точек лампы, происходит спекание пластика внутри герметичной камеры принтера. Стоимость оборудования от 400\$ [8], расходных материалов от 30\$. Самым большим положительным аспектом оборудования быстрого прототипирования, работающего по такому принципу, является его точность и способность воспроизводить самые мелкие детали (меньше 1мм по всем осям). Однако из отрицательных сторон то, что происходит большой расход смолы, так как изделия всегда получаются на 100% заполнены пластиком, из-за технологии спекания. Больше всего востребованы в ювелирной и медицинской промышленности.

- B3 - CJP (Color Jet Printing) – Новая технология с весьма дорогостоящим оборудованием, создающая изделия путем спекания порошковых полимеров внутри герметичной камеры. Если предыдущие 2 типа являются крайне распространенными, но могут себе позволить печать не более чем 1-2 цветами (зависит от конфигурации того или иного устройства быстрого прототипи-

рования), то данная технология, как видно из названия, предлагает комплексное создание полноцветного изделия. Помимо высокой стоимости оборудования (свыше 15000\$), необходимо так же закупать дорогостоящие расходные материалы. Данный вид прототипирования является развивающимся направлением, по своей сути не особенно отличающимся от метода FDM, но обладающий бесспорным преимуществом в виде отсутствия необходимости в окраске готовых изделий перед презентацией или установкой, если в ней требуется многоцветные элементы [9]. Можно утверждать, что как только данная технология станет намного дешевле, она найдет себя среди рынка создания игрушек и фигурок для настольных игр.

- B4 - MJM (Multi Jet Modeling) — По своей сути эта технология является смесью FDM и DLP, способная выполнять полноцветную печать, по СППЧ. В основе технологии — подвижный экструдерный блок [10], с огромным количеством мелкодисперсных сопел, расположенных в шахматном порядке. В самых простых моделях они начинаются от 96 штук, а в более дорогих, достигают более чем четырех сотен. Блок движется вдоль рабочей поверхности не только используя послойное наплавление фотополимера с помощью УФ лампы, но и в качестве поддерживающих структур использует восковые полимеры, что облегчает обработку готового изделия и не влияет отрицательно на качество готового продукта. Чаще всего используется для изготовления мастер-моделей для последующего литья в силиконовых формах. Среди недостатков, конечно же, выделяется высокая стоимость оборудования и расходных материалов.

В качестве общих черт оборудования можно назвать необходимость в цифровой модели изделия, относительно низкие затраты для выпуска единичного изделия и быстроту от этапа проекта до готового образца. В качестве мастер-модели выбрана деталь, габаритами 60x60x60 мм, являющаяся элементом конструкции принтера. Именно она является образцом, с помощью которого были выставлены оценки тому или иному оборудованию во время проведения тестов.

Для того чтобы была возможность эффективно выбирать из альтернатив, нужно учитывать их предпочтительные качества, для чего используется метод анализа иерархии.

Данные и методы

В ситуации, когда присутствует более чем 2 альтернативы при выборе среди чего-либо по обозначенному списку критериев, и когда нельзя явно указать очевидно преимущество одного над другим, необходимо использовать метод анализа иерархий. Основанный на методе экспертных оценок, он помогает принять наиболее эффективное решение с помощью визуального отображения итоговых данных. Для этого необходимо:

— Проанализировать поставленную задачу, отобразив ее с помощью иерархической модели, состоящей из 3-х уровней. Вначале строится прямая иерархическая структура, начинающаяся от поставленной задачи, от которой отходят степени влияния на уровень вниз через критерии выбора к нижнему ярусу альтернатив. Затем проводятся оценочные действия, выявляющие доминирование одного параметра над другим, с целью выстроить матрицу результатов для проведения попарных сравнений критериев и альтернатив.

— Собрать большой массив данных и переработать в удобные для расчетов подгруппы. Иными словами, реализовать метод динамического программирования.

— Оценить связанность данных или их противоречивость. Это необходимо для углубленного понимания поставленной задачи, в рамках проведения оценочных действий. Для этого используется расчет согласованности мнений экспертов и высчитывается коэффициент ОС.

— Рассчитать вес конкретных критериев и альтернатив, относительно друг друга. В качестве элементарной единицы матрицы, обозначающей степень влияния одного критерия над другим, используется оценка от 1 до 9 (a) [11]. Зачастую, эксперт выставляет только нечетные значения, если количество критериев не превышает 5 единиц; четные же значения используют для более точного расчета. Безусловно при построении матрицы возникает необходимость также показать слабость альтернативы, относительно другого параметра. В таком случае, используется значение b , равное единице деленной на a .

— Широко обсудить проблему, используя мозговой штурм, метод Дельфи т.д. Благодаря объему идей от квалифицированных специалистов, можно рассмотреть поставленную задачу со всех необходимых сторон.

— Классифицировать каждый фактор, влияющий на итоговые решения, принятые экспертом или экспертной группой. Именно эти параметры будут исследованы для составления выводов.

— Оценить легитимность принятого решения. Его можно считать таковым, если при итоговых расчетах отношение согласованности не будет превышать 15% [12] от значения случайной согласованности, которая берется в зависимости от количества альтернатив.

Модель

Определившись со списком критериев и альтернатив, можно начать выстраивать иерархическую структуру [13] зависимостей критериев и альтернатив, необходимую для визуального отображения задействованных параметров при расчетах

Далее, для оценивания критериев необходимо составить матрицу попарных сравнений для критериев и альтернатив размерностью 5×4 [14]. В данной матрице идет сопоставление альтернатив в их преимущественном отношении одного фактора над другим. Оно составляется согласно мнению выбранного эксперта и является субъективным решением, основанным на эмпирических наблюдениях и выводах. Для решения более серьезных задач необходимо всегда собирать экспертную группу, специализирующуюся на заданном вопросе. В такой ситуации также необходимо будет учитывать расчет оценки согласованности экспертов, во избежание неоднородности обработанных данных. В данной работе достаточно одного эксперта для решения поставленной задачи. Для определения его степени компетенции и объективности при отработке метода анализа иерархий, необходимо произвести последовательность оценочных действий [15], согласно формуле 1, с помощью оценок, выполняемых экспертом самому себе.

$$K_{\text{комп}} = \frac{K_{\text{осв}} + K_{\text{арг}} + K_3}{3}; \quad (1)$$

где $K_{\text{осв}}$ – величина осведомленности эксперта в данной задаче. Является формализованным знанием эксперта по каждому из вопросов, рассматриваемых в рамках данной задачи. Рассчитывается с помощью выставления экспертом оценок по 5 графам, в соответствии с его квалификацией. Итоговый результат получается путем сложения всех оценок, имеющих числовые

значения уже в установленной таблице расчетов, в единое число.

— $K_{\text{арг}}$ – формализованные сведения об источниках аргументации эксперта и о характере их воздействия на решения, которые принимает эксперт. Рассчитывается с помощью выставления экспертом оценок из низкой, средней и высокой степени воздействия по 6 пунктам соответственно. Конечный результат получается путем сложения всех оценок, имеющих числовые значения уже в установленной таблице расчетов [16], в единое число.

— K_3 – величина информированности эксперта с данной задачей. Выставляется экспертом также самостоятельно от 0 до 10 и рассматривается как десятичная дробь, в отношении выбранной экспертом оценки.

Для однозначного ответа, подходит ли выбранный эксперт для проведения качественного анализа необходимо, чтобы его коэффициент компетентности был выше 0,7. Используя формулу 1, было выяснено, что в данной работе эксперт, выставляющий оценки для метода анализа иерархии имеет оценку, равную 1,24, что более чем удовлетворяет требованиям методики

определения уровня подготовки. После проведенной работы следует приступить непосредственно к методу анализа иерархий и провести ранжирование критериев: поочередно эксперт сравнивает альтернативу методов печати из столбца с альтернативами в строках, указывая величину превосходства одного метода над другим согласно степеням иерархии, указанным ранее. В ситуации, когда один из критериев является менее сильным по сравнению с выбранным, вводится дробное числовое значение, обратное единичному показателю. В качестве наглядного примера и для уменьшения объема данных в работе будут показаны расчеты только для значения скорости печати среди всех типов оборудования быстрого прототипирования – остальные критерии были рассчитаны по аналогии. Далее для каждой альтернативы производится расчет весового значения параметров P_c , путем сложения всех коэффициентов, полученных ранее (формула 2). Полученные данные заносятся в табл. 1.

$$\sum Kn_i = K11 + K12 + K13 + K14 \quad (2)$$

Таблица 1

Ранжирование альтернатив для скорости печати
Ranking alternatives for printing speed

	FDM	DLP	CJP	MJM
FDM	1	5	7	3
DLP	0,2	1	3	0,33
CJP	0,14	0,33	1	0,14
MJM	0,33	3	7	1
Сумма	1,67	9,33	18	4,47

Далее проводится расчет показателя P_c (формула 3), показывающего преимущество одного типа оборудования над другим в рамках выбранного критерия одним экспертом.

$$P_c = \frac{K_i}{\sum Kn} \quad (3)$$

Затем рассчитывается среднее геометрическое значение A_i для каждой альтернативы (формула 4). Оно является промежуточным действием для итогового расчета меры согласованности оценок эксперта, где:

— n_B – количество альтернатив,

$$A_i = \frac{\sum P_{ci}}{n_B} \quad (4)$$

Исходя из предыдущих расчетов, можно получить итоговую меру согласованности X по каждой альтернативе. Она находится с помощью перемножения двух матриц суммы оценок по каждой альтернативе со среднегеометрическими значениями каждой альтернативы, с последующим делением их на среднегеометрическое значение оценок по каждой альтернативе (формула 5).

$$X = \frac{(K11 K21 K31 K41) * \begin{pmatrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \end{pmatrix}}{A_i} \quad (5)$$

Затем из полученных мер согласованности находится значение λ , являющееся средним значением из всех мер согласованности, равное 4,14. Итоговые значения заносятся в табл. 3 для последующей обработки. После чего производится расчет индекса согласованности «ИС» (формула 6), как разница между средним значением мер согласованности с количеством альтернатив, деленная на количество альтернатив, за вычетом одной, где ИС=0,0469.

$$ИС = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6)$$

Затем необходимо провести расчет отношения согласованности ОС (формула 7). Для ситуации с 5 альтернативами, значение случайной согласованности СС берется равное 0,9.

$$ОС = \frac{ИС}{СС} \quad (7)$$

Итоговое значение будет равно 0,0521. Для того чтобы говорить о том отвечает ли полученный результат условиям расчетов, его необходимо оценить. В данной работе оно равно 5,21%, что говорит об однородности ряда оценок и о том, что возможно производить дальнейшие вычисления.

Получив необходимые данные по всем критериям среди всех альтернатив, необходимо исследовать вес каждого критерия по отдельности. Строка с весовыми коэффициентами получена путем расчёта весовых значений по каждому критерию среди всех альтернатив. Взвешенная оценка глобального приоритета P_g получена путем суммы произведений матриц весовых коэффициентов по каждому критерию на каждый коэффициент критерия отдельно взятой альтернативы (формула 8).

$$P_{gn} = \sum(Kn \times Vn) \quad (8)$$

После чего полученные данные заносятся в табл. 2.

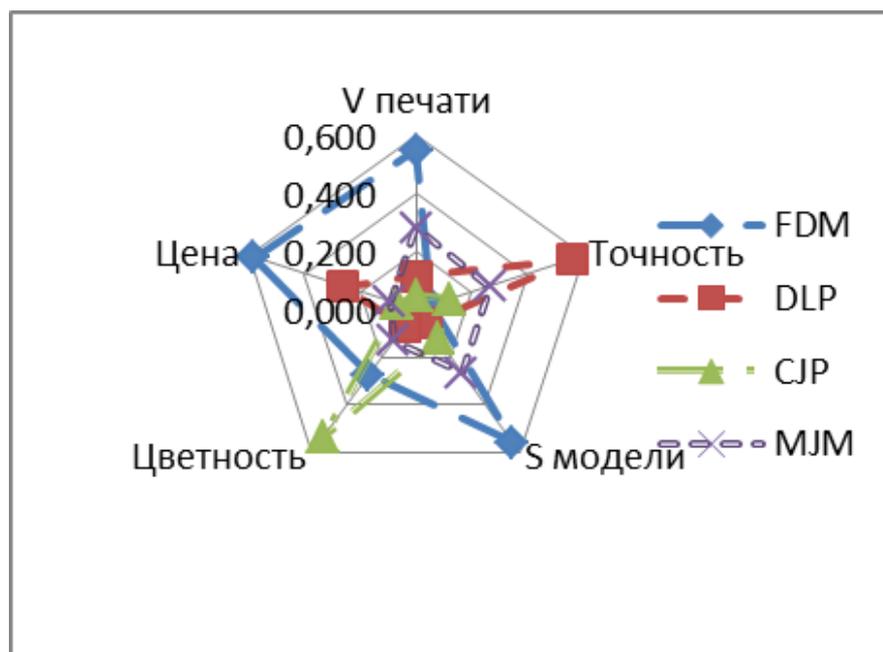
Таблица 2

Итоговые расчетные значения
Final calculated values

	V печати	Точность	S модели	Цветность	Цена	Pg
Вес	0,503	0,260	0,134	0,068	0,035	Pg
FDM	0,548	0,057	0,558	0,273	0,582	0,4
DLP	0,117	0,558	0,057	0,067	0,260	0,2
CJP	0,052	0,122	0,122	0,533	0,065	0,1
MJM	0,283	0,263	0,263	0,128	0,092	0,3

Полученные значения отражают в числовом эквиваленте значимость одной альтернативы над другой. Для наглядности и простоты восприятия оформляется лепестковая диаграмма, основанная

на значениях весовых коэффициентов, полученных из расчетов, не учитывая весовой коэффициент и итоговую взвешенную оценку (рисунок).



Лепестковая диаграмма результатов
Petal diagram of results

Полученные результаты

FDM – оборудование является бесспорным лидером среди всех отобранных методов, согласно параметру P_g. Оно также занимает самую сильную позицию по 3-м из 5 критериев при подсчетах, о чем говорят среднегеометрические оценки альтернатив.

MJM – оборудование, несмотря на неочевидность своего положения согласно лепестковой диаграмме, занимает второе место по критерию P_g. Не являясь лидером в каком-либо отдельно взятой альтернативе, оно, тем не менее, сочетает в себе вторые места по 3 критериям.

DLP – оборудование по рассчитанным параметрам не сильно отстает от MJM, занимая при этом ведущую позицию в точности печати. Однако следует учитывать, что расходные материалы, как и сама цена оборудования, на порядок ниже MJM, что, при иных результатах выставления оценок эксперта, помогло бы данному типу оборудования занять второе место.

CJP – оборудование занимает последнее место среди прочих альтернатив из-за своей цены и скорости печати. Данные параметры, зачастую, являются определяющими при выборе методики печати, что негативно сказывается при выборе закупать ли подобную технологию для производства или нет. Однако, в рамках других поставленных задач, оно могло быть единственным подходящим решением благодаря своей

уникальной особенности в создании поддерживающих структур.

Заключение

Актуальность оборудования быстрого прототипирования приобретает все большее и большее значение, в связи с чем, при возникновении необходимости в выборе наилучшего варианта среди альтернатив, необходимо иметь доступный и понятный механизм, помогающий принять решение.

Модель для выбора оборудования среди альтернатив, использованная в работе, является наиболее легкой для понимания и интерпретации результатов. С ее помощью можно быстро и качественно произвести оценку среди альтернатив, для подбора наиболее выгодных условий на производстве, в соответствии с предъявляемыми требованиями

Благодаря квалификации эксперта, подтвержденной с помощью коэффициента компетенции, оценки, выставленные во время проведения анализа иерархий, имеют достаточную согласованность (5,21%), что говорит об объективности полученных результатов исследования, в рамках поставленной задачи, и дает возможность использовать данную работу для последующего использования при принятии аналогичных решений.

Итоговым результатом можно назвать полученное решение, что FDM оборудование на

данный момент обладает наибольшими конкурентными качествами, благодаря его стоимости, скорости печати и потенциальным размерам готового изделия. В качестве альтернатив можно рассмотреть методы MJM и DLP, если потребуется выпускать готовое изделие более чем одним цветом, либо если его размеры должны максимально соответствовать мастер-модели.

Библиографический список

1. Ian Gibson, David Rosen. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing - Second edition. 2015. 219-220с
2. 3D-Wiki. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия. Электронный ресурс. URL-https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/. [Дата обращения: 01.10.2019].
3. Мыльник В.В., Титаренко Б.П., Волочиенко В.А. Исследование систем управления. – М.: Академический Проект, 2003. 54-56 с.
4. Zedpost. Критерии выбора 3d принтера. Электронный ресурс. URL-<https://zedpost.ru/kriteriivibora-3d-printera.html/>. [Дата обращения: 13.12.2019].
5. Rupinder Singh, J. Paulo Davim, Manufacturing Design and Technology Series. Additive manufacturing applications and innovations. 2019. 14-18с.
6. L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, David Ian Wimpenny. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. 2019. 194с
7. Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong. Academic Press. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3d Printing And Additive Manufacturing. 2017. 5-10 с.
8. 3D-принтеры. Электронный ресурс. URL-<https://3dtoday.ru/3d-printers/>. [Дата обращения: 12.10.2019]
9. 3DPrintExpo. News. What is ColorJet Printing? Электронный ресурс. URL-<https://3d-expo.ru/en/article/chto-takoe-tsvetnaya-struynaya-pechat-cjp-79787/>. [Дата обращения: 12.12.2019]
10. Andreas Gebhardt, Jan-Steffen Hötter. Hanser Publications. Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. 2016. 137-140 с.
11. Cloud of Science. 2016. Т. 3. № 2/ ISSN 2409-031X/ Томас Л. Саати/ Питтсбургский университет Питтсбург, штат Пенсильвания, США. 180-182с
12. Оценка экономических величин и управление предприятием: теория и практика для студентов и исследователей. Метод анализа иерархий: процедура применения. Электронный ресурс. URL-<http://vamocenka.ru/metod-analiza-ierarxij-procedura-primeneniya/>. [Дата обращения: 18.12.2019]
13. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении – М.: Финансы и статистика, 2002. – 258 с.
14. Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования» Цибизова Т.Ю., Карпунин А.А. Применение метода анализа иерархий в оценке качества процессов управления // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-1; Электронный ресурс. URL-<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20847/>. [Дата обращения: 08.12.2019].
15. Елтаренко Е.А., Крупинова Е.К.. Обработка экспертных оценок. – М.: МИФИ, 1982. – 49 с.
16. Белый В.С., Серeda Д.А. Научная статья «Определение компетентности экспертов, привлекаемых для проведения экспертизы». 2018. 4-6 с.

Поступила в редакцию – 14 апреля 2020 г.
Принята в печать – 20 мая 2020 г.

References

1. Ian Gibson, David Rosen. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing - Second edition. 2015.219-220с
2. 3D Wiki. All about 3D printing. Additive manufacturing. Basic concepts. Electronic resource. URL-https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/. [Date of appeal: 01.10.2019].
3. Mylnik V.V., Titarenko B.P., Volochienko V.A. The study of control systems. - M.: Academic Project, 2003.54-56 p.

4. Zedpost Criteria for choosing a 3d printer. Electronic resource. URL-<https://zedpost.ru/kriteriivibora-3d-printera.html/>. [Date of treatment: 12/13/2019].
5. Rupinder Singh, J. Paulo Davim, Manufacturing Design and Technology Series. Additive manufacturing applications and innovations. 2019.14-18 p.
6. L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, David Ian Wimpenny. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. 2019.194s
7. Chee Kai Chua, Chee How Wong, Wai Yee Yeong. Academic Press. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3d Printing And Additive Manufacturing. 2017.5-10 s.
8. 3D printers. Electronic resource. URL-<https://3dtoday.ru/3d-printers/>. [Date of appeal: 12/10/2019]
9. 3DPrintExpo. News. What is ColorJet Printing? Electronic resource. URL-<https://3d-expo.ru/en/article/chto-takoe-tsvetnaya-struynaya-pechat-cjp-79787/>. [Date of treatment: 12.12.2019]
10. Andreas Gebhardt, Jan-Steffen Hötter. Hanser Publications. Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. 2016.137-140 s.
11. Cloud of Science. 2016. T. 3. No. 2 / ISSN 2409-031X / Thomas L. Saati / University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA. 180-182s
12. Evaluation of economic values and enterprise management: theory and practice for students and researchers. Hierarchy analysis method: application procedure. Electronic resource. URL-<http://vamocenka.ru/metod-analiza-ierarxij-procedura-primeneniya/>. [Date of treatment: 12/18/2019]
13. Anfilatov V.S., Emelyanov A.A., Kukushkin A.A. System analysis in management - М.: Finance and statistics, 2002. - 258 p.
14. Electronic scientific journal "Modern Problems of Science and Education" Tsibizova T.Yu., Karpunin A.A. Application of the method of analysis of hierarchies in assessing the quality of management processes // Modern problems of science and education. 2015.№ 2-1; Electronic resource. URL-<http://www.science-education.ru/ru/article/view?Id=20847> /. [Date of treatment: 12/08/2019].
15. Eltarenko EA., Krupinova EK. Processing of expert assessments. - М.: МЭФІ, 1982.- 49 p.
16. Bely V.S., Sereda D.A. Scientific article "Determining the competence of experts involved in the examination." 2018. 4-6 p.

Received – 14 April 2020

Accepted for publication – 20 May 2020

Научное издание

ОРГАНИЗАТОР ПРОИЗВОДСТВА

Теоретический и научно-практический журнал

Т. 28 № 2

В авторской редакции

Дата выхода в свет: 17.06.2020
Формат 60×84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 13,6. Уч.-изд. л. 11,2.
Тираж 500 экз. Заказ № _____
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 г. Воронеж, Московский просп., 14

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84