

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2023 В.А. Тушавин, Е.А. Фролова, А.В. Чабаненко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 06.10.2023

Появление «цифровых двойников» стало естественным результатом развития идеи «цифрового производства» и концепции Промышленного Интернета Вещей. В настоящее время во многих промышленных сферах активно собираются данные о работе оборудования. В последние годы цифровая трансформация позволила не только полностью анализировать эти данные с использованием передовой аналитики, но также делать обоснованные решения для оптимизации операций в различных отраслях. Такие новые технологии моделирования также позволяют производителям внедрять цифровые копии в своих продуктах и процессах. Новые проекты можно тестировать в виртуальной среде, что экономит время, средства и ресурсы. Цифровой двойник может значительно ускорить решение физических проблем, обеспечивая высокую точность обнаружения, а также помогать создавать продукты высшего качества и обеспечивать более качественное обслуживание клиентов. С использованием такого интеллектуального подхода компании могут достигать ценности и преимуществ гораздо быстрее, чем когда-либо ранее. Развитие методологии квалиметрии моделей должно идти параллельно в двух взаимосвязанных направлениях исследований, взаимно дополняя и обогащая друг друга. Первое направление работы должно фокусироваться на общих аспектах квалиметрии моделей и базироваться на обобщении результатов, полученных в рамках многочисленных специфических прикладных теорий оценки и управления качеством моделей, которые разрабатываются в каждой из предметных областей (второе направление исследований).
Ключевые слова: квалиметрия, цифровое производство, моделирование, цифровой прототип, цифровой двойник.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-84-91

EDN: JBNFAC

Работа выполнена при финансовой поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, “Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга”.

Цифровой двойник (digital twin) - это виртуальная модель реального объекта или процесса, которая позволяет симулировать, анализировать и оптимизировать работу этого объекта или процесса в виртуальной среде. В аддитивном производстве цифровые двойники используются для предсказания поведения объектов при их создании на 3D-принтере и оптимизации параметров процесса.

При применении в аддитивном производстве цифровой двойник можно охарактеризовать как развивающийся цифровой профиль, отображающий историческое и текущее пове-

Тушавин Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: vladimir.a@tushavin.ru

Фролова Елена Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: frolovaelena@mail.ru

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества. E-mail: a@chabanenko.ru

дение физического объекта или процесса и способствующий оптимизации процесса производства (рис. 1) [1-3].

Использование цифрового двойника позволяет сократить затраты на проектирование, повысить качество конечного продукта (рис. 2).

Задача оценки характеристик целевой модели (ЦМ) относится к области квалиметрии моделей и обычно включает в себя два основных подхода: оценку качественных показателей, которые определяют пригодность модели для целей ее использования, и оценку количественных показателей, которые измеряют отклонения свойств модели от свойств объекта моделирования.

Использование первого подхода позволяет только обосновать выбор концепции моделирования, но не предоставляет количественных требований к самой модели. В то время как второй подход позволяет оценить точность оценок свойств ЦМ, но не дает информации о воздействии этих характеристик на качество (эффек-

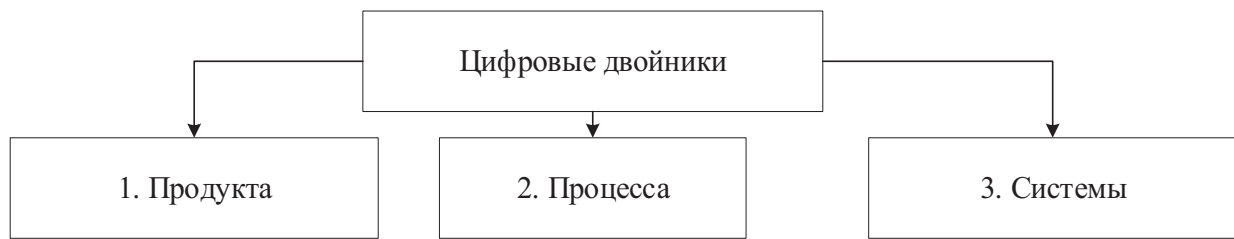


Рис. 1. Применение цифровых двойников

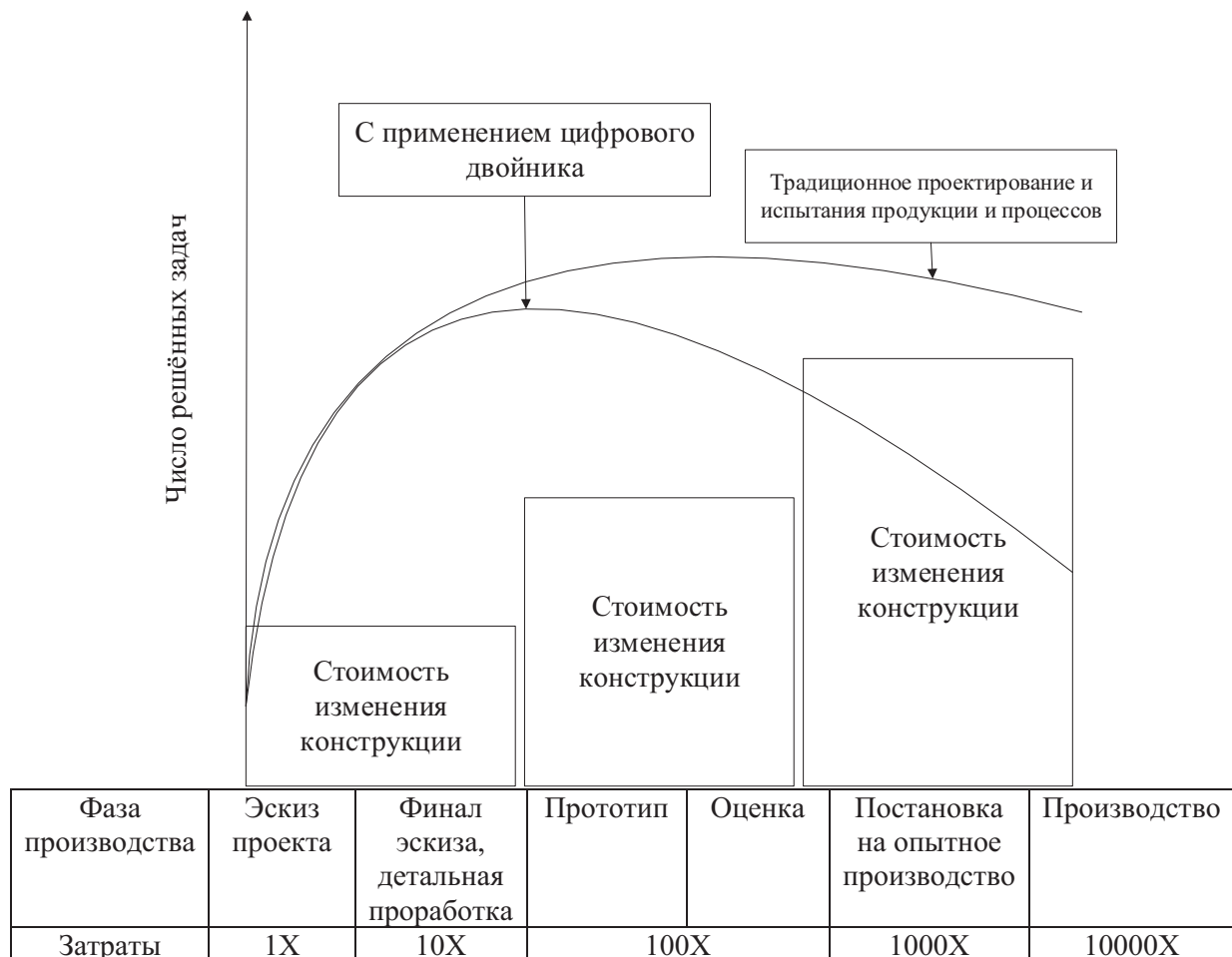


Рис. 2. Концепция сокращения затрат за счет применения цифрового двойника

тивность) применения модели. В данной статье предложен совершенно новый метод оценки целевых характеристик ЦМ.

Согласно концепции Всеобщего менеджмента качества (рис. 3) (Total Quality Management), понятие качества объекта означает величину, которая отражает соответствие характеристик этого объекта требованиям всех заинтересованных сторон, включая потребителей, общество, партнеров, работников и акционеров (учредителей) научной организации. Качество научно-технических работ может быть рассмотрено как качество их результатов и качество процесса выполнения работ. Важно отметить, что качество научно-технических работ выражается в удовлетворенности заинтересованных сторон, особенно потребителей, и является внутренней

характеристикой самих работ, их результатов и процесса выполнения.

Оценка качества может быть проведена с использованием квалиметрических моделей, которые представляют собой методы количественной оценки, объектов, процессов и явлений. Применение квалиметрических методик для оценки качества позволяет точно измерять не только абсолютные качественные параметры объектов, но и сравнивать их с другими объектами, выявляя относительные показатели [4-6].

Методология квалиметрического подхода к оценке качества объектов включает следующие основные этапы:

1. Рассмотрение качества объекта как структурированного иерархического графа свойств и объектов.

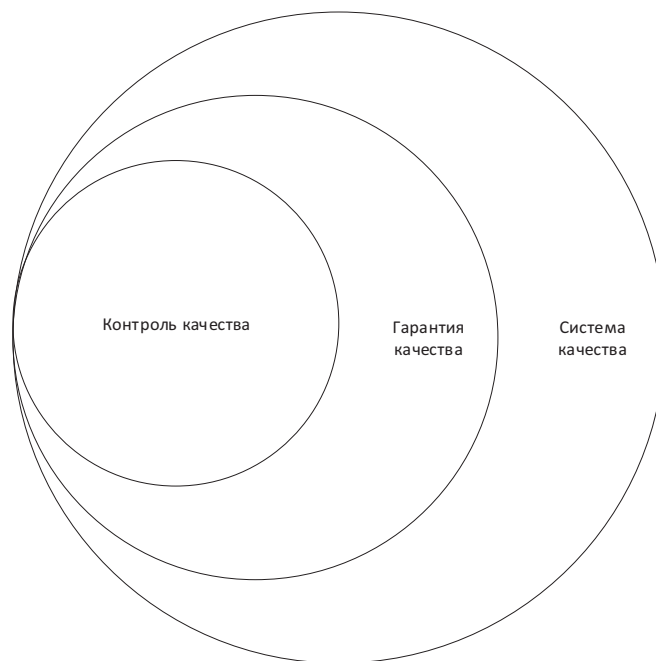


Рис. 3. Концепция уровней качества

2. Выделение простых неделимых свойств.
3. Присвоение измеримых параметров этим свойствам.
4. Разработка шкал измерения параметров.
5. Выбор базовых (эталонных) параметров.
6. Расчет единичных показателей качества.
7. Определение значимости показателей качества.

8. Расчет комплексных показателей качества на всех уровнях структурированного графа с учетом их значимости.

Самая объективная комплексная оценка качества научно-технических работ достигается, рассматривая их как процесс. Для этой цели разрабатываются количественные показатели, которые отражают качество деятельности научных организаций, выполняющих научно-технические работы. В этой рамке создается показатель (К) как комплексное качество научно-технических работ. Этот подход удобно осуществлять с использованием моделей, таких как Модель Премии по качеству и ее адаптация к деятельности научных организаций. В этих моделях ключевым является разделение всех показателей качества деятельности на группу показателей результатов и группу показателей потенциала организации. Внутри каждой группы можно выделить показатели, наиболее характерные для конкретного отраслевого направления, такого как научно-исследовательская сфера. Логика такого подхода заключается в использовании способностей организации для достижения результатов научной деятельности.

Область науки, которая объединяет количественные методы для оценки качества и используется для обоснования решений в

управлении качеством продукции, известна как квалиметрия. Основные цели квалиметрии включают в себя определение необходимых показателей качества продукции, разработку методов количественной оценки качества, создание методики учета изменений качества во времени и моделирование градации качества. В общем виде оценка уровня качества продукции может быть представлена в виде схемы, в которой все операции можно разделить на три этапа: подготовительный, оценочный и заключительный.

На подготовительном этапе выполняются следующие действия:

1. Устанавливаются цели, организуются и планируются необходимые работы по оценке качества, включая определение видов, объектов и сроков проведения оценки.

2. Определяется номенклатура показателей качества, которые должны быть оценены для данной продукции.

3. Выбираются методы сбора и получения информации о фактических числовых значениях показателей качества, а также методы их определения.

4. Рассчитываются фактические числовые значения для уровней качества.

На оценочном этапе выполняются следующие операции:

1. Выбирается метод для оценки уровня качества.

2. С использованием выбранного метода выполняются технические операции для оценки показателей качества.

3. Определяются и анализируются результаты оценки уровня качества.

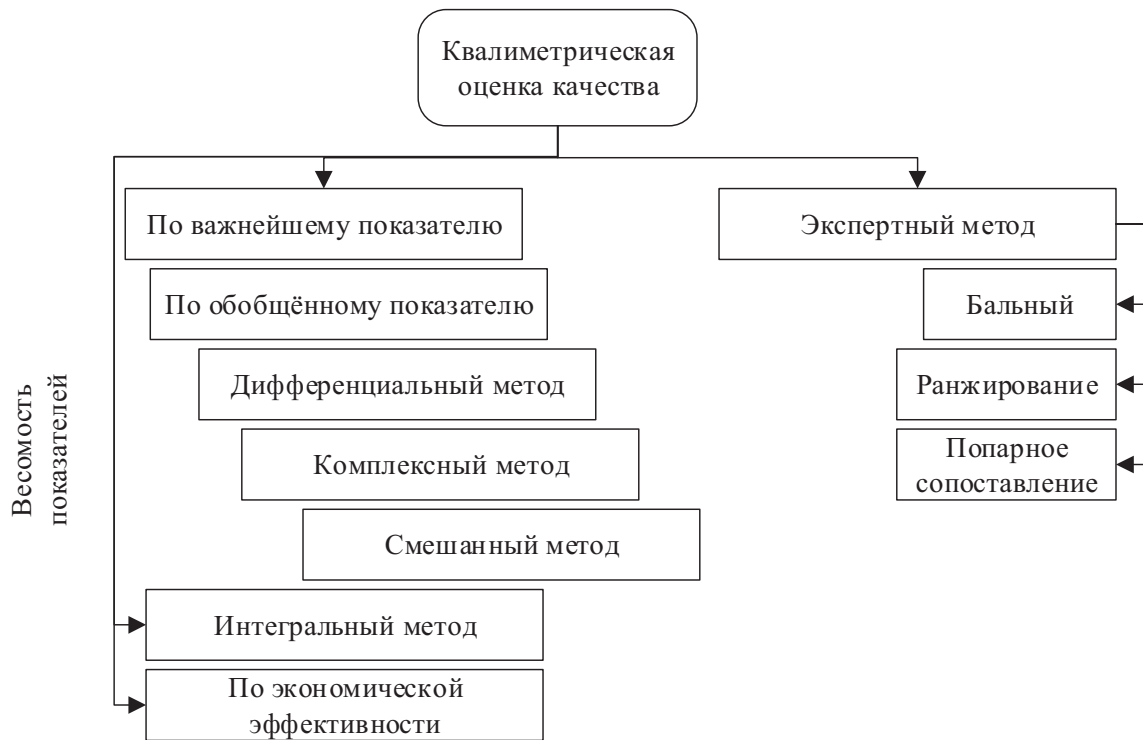


Рис. 4. Методы квалиметрической оценки качества продукции

На заключительном этапе обосновываются рекомендации и принимаются решения на основе результатов оценки уровня качества продукции. Этот представленный алгоритм оценки качества является применим на всех этапах жизненного цикла продукции, включая этап проектирования (рис. 4).

При меньшем, чем в стандартах, количестве единичных показателей или групп показателей свойств пересчет коэффициентов весомости производится по формуле

$$a_i' = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i},$$

где a_i' – значение коэффициента весомости i -го показателя (группы) после пересчета;

a_i – значение коэффициента весомости i -го показателя по стандарту;

$\sum a_i$ – сумма коэффициентов весомости соответствующих показателей; n' – количество отсутствующих показателей.

При большем, чем в стандартах, количестве показателей свойств качества пересчет производится по формуле

$$a_i' = a_i \left(1 - \sum_{i=1}^n a_i \right),$$

где n' – количество дополнительных показателей свойств;

$\sum a_i$ – суммарное значение коэффициентов весомости добавленных показателей свойств.

Цифровой двойник (ЦД), предназначенный для обеспечения выработки управляющего воздействия на основе информации о текущем состоянии объекта управления и прогнозирования его изменения. Источником данной информации выступает цифровая модель аддитивной установки.

Определим базисные множества:

$T = [0, \infty)$ – множество моментов времени;

$P = [0, 1]$ – множество вероятностей.

Объект управления C представляется в виде кортежа:

$$C = (X, Y, Z, U, \varphi, \psi),$$

где X – множество входных воздействий;

Y – множество выходных воздействий аддитивного процесса;

Z – множество состояний аддитивного процесса;

U – множество управляющих воздействий на аддитивный процесс;

φ – функция переходов, ставящая в соответствие для каждого момента времени входному и управляющему воздействиям, а также состоянию вероятностную меру, заданную на множестве состояний

$$\varphi : Z \times X \times U \times T \times Z \rightarrow P;$$

ψ – функция выходов, ставящая в соответствие для каждого момента времени входному и управляющему воздействиям, а также состоянию выходное воздействие

$$\psi : Z \times X'U'T \rightarrow Y.$$

Цифровая модель C^u представляется кортежем:

$$C^u = (X^u, Y^u, Z^u, U, T, j^u, \psi^u),$$

где X^u – модель входного воздействия;

Y^u – модель выходного воздействия;

Z^u – модель состояния КФС;

j^u – модельная функция переходов.

Достоверность представляет собой характеристику ЦД, отражающую степень соответствия объекта управления и ЦД. Если модель является полной и достоверной, то ее можно использовать для получения информации об объекте управления без ограничений, что является целью разработки модели. Следовательно, при оценивании целевых характеристик модельного отношения необходимо и достаточно оценить его достоверность и полноту [7, 9].

ЦД процесса филаментизации полимера на этапе гомогенизации. Поведение полимерного прута на этапе гомогенизации в аддитивной установке.

В программе учитываются аспекты физики полимеров в разных масштабах длины и времени, а также методы моделирования, подходящие для их изучения. Моделирование поведения полимерного прута в рамках реалистичной модели необходимо для получения количественного представления о локальных релаксационных процессах. Это исследование также покажет важность движения учета вязкости в динамике полимеров, обусловленных наличием непостоянного нагревания вдоль сопла. Универсальная крупномасштабная цепная релаксация также может быть изучена с помощью реалистичных моделей, но с гораздо большей статистической точностью с помощью моделирования методом Монте-Карло крупнозернистой решетчатой модели.

Моделирование поведения полимерного прута необходимо для расчета расхода материала и прочности конечного изделия.

Для полимеров типичны для ситуации, когда при одной и той же начальной температуре скорость упрочнения/разупрочнения в пластической области зависит от скорости деформации.

Для применения модели к какому-либо типу материалов необходимо предварительное построение двух определяющих соотношений. Первым соотношением является уравнение состояния среды в виде зависимости термодинамического потенциала от первого и второго инвариантов тензора эффективной упругой деформаций. Такое уравнение состояния применимо и в тех областях, где нельзя ограничиться рассмотрением шарового тензора деформаций. Для практических расчетов широкое применение получил метод полуэмпирических уравнений состояния, в котором термодинамический потенциал представляют в виде суммы слагаемых: холодной энергии и слагаемых, определя-

емых тепловым возбуждением.

Процедуры преобразования, которые позволяют вам взять поверхность (функцию z от (x, y) или (q, r)) и преобразовать ее в твердое тело; аналогично для вывода в виде STL для обработки на 3D-принтере. Есть два варианта, один в декартовых координатах, а другой в полярных координатах.

Поле выбора подходящего полимера проводится имитационное моделирование на физические свойства [9].

Данные записывались в Excel - файлов, которые использованы для ввода в программах FE, таких как Abaqus Unified FEA. Входные данные для Abaqus направлялись в анализ напряжений и пластической деформации в различных температурных средах. Определены участки номинальных напряжений при различных температурных режимах, что позволяет спрогнозировать для каких температурных режимов предназначен полимер, выполненный из различных материалов (рис. 5).

Для успешного применения композиционных материалов необходимо учитывать упрощенную схему внутренней части головки аддитивной установки.

Участке 1. Находится поступающий холодный полимер. Его свойства еще не изменились от нагрева, поэтому его сопротивление движению определяется трением о стенки.

Участок 2. Зеленого цвета. В этой части полимер уже несколько нагревается от стенок и механические свойства его ухудшаются, однако текучесть еще не проявляется.

Участок 3. Температура становится выше и начинается пластическая деформация прутка. Под давлением он раздается в стороны, образуя поршень.

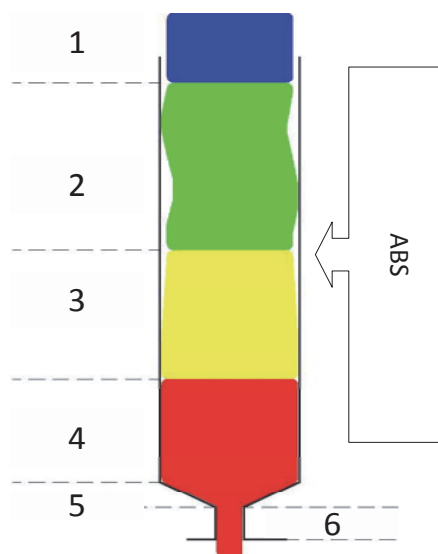


Рис. 5. Структура процесса филаментизации полимера

Участок 4. В этой зоне полимер должен расплавляться до самого центра, то есть полностью. В противном случае, если к соплу подходит не расплавившийся сердечник, наблюдается неравномерность выдавливания пластика. Такое явление хорошо наблюдалось с полимером 1,7-1,8 мм и диаметром сопла 1мм, при скорости подачи полимера 490 - 900 мм/мин.

Участок 5 - зона сжатия потока форма и длина этого участка не слишком важны - чем меньше длинна данного участка, тем лучше.

Участок 6. Окончание сопла. Наконечник до 0,45 мм. Это участок с самым большим сопротивлением, поэтому его длина очень влияет на сопротивление. При длине 0,45 мм и диаметре сопла 0,25 мм, как оказалось, 48% всего сопротивления приходится на долю этого участка. Необходимо учитывать, что удлинение этого участка ведет не только снижению скорости, но и оказывает сглаживающее действие на подачу полимера, сокращая раздутие на больших скоростях. На рис. 6 и рис. 7 представлен этап гомогенизации полимера и модель поведения слоя полимера.

При помощи моделирования возможно установить требования к материалам для про-

изводства так и для прогнозирования качества готового изделия на основе модели поведения материала в виде прута из полимера.

Для получения качественных деталей необходимо осуществлять планирование, которое включает не только установление целей и задач, но и определение, обеспечение и поддержание инфраструктуры и ресурсов, необходимых для функционирования процессов, а именно планирование использования оборудования и поддержание процесса производства на надлежащем уровне качества. В этом случае и качество деталей будет на высоком уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровой двойник принципиально отличается от имитационной модели системы тем, что имитационная модель описывает класс систем, а ЦД - только отдельную систему. Это означает, что структура и параметры ЦД могут изменяться в процессе создания и функционирования КФС, отражая изменение ее состояния. Предложенный в статье метод оценивания характеристик цифровой модели КФС может быть использован для решения задач структурного и

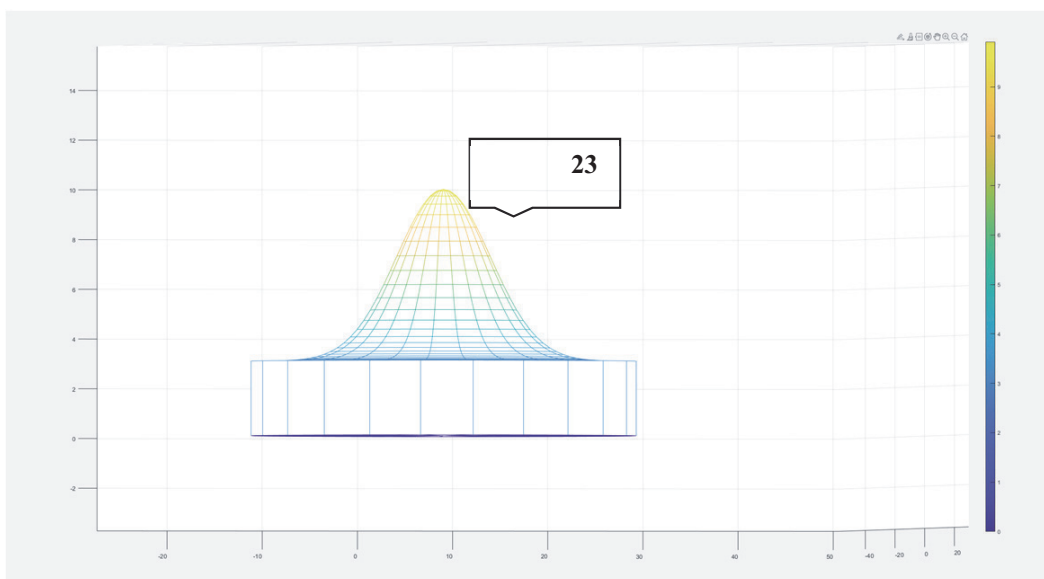


Рис. 6. Этап гомогенизации полимера

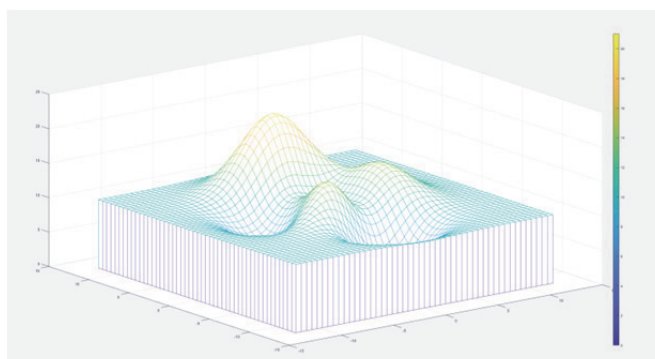


Рис. 7. Модель поведения слоя полимера

параметрического синтеза ЦД, а также анализа эффективности их функционирования на всех этапах жизненного цикла КФС. Достоинствами метода являются:

1. Метод основан на анализе целевой функции КФС, за счет чего критерий, используемый при оценивании достоверности, приобретает явный физический смысл, что облегчает его обоснование.

2. Обучающая выборка может пополняться в процессе функционирования ЦД, что повышает точность оценивания характеристик ЦМ на различных этапах жизненного цикла КФС.

3. Результатом метода являются аналитические модели, которые могут быть использованы в оптимизационных алгоритмах без существенных требований к вычислительным ресурсам.

Безусловно, необходимым условием для применения метода является наличие априори более точной имитационной модели (или проведение большого количества наблюдений с существующей КФС). Однако, это условие является необходимым для всех задач квалиметрии моделей ввиду особенностей постановки задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chabanenko A. V., Kurlov A. V. 2021. Control the quality of polymers based on the model of Dzeno. *Journal of Physics: Conference Series*.
2. Chabanenko A. V., Kurlov A. V. and Tour A. C. 2020. Model to improve the quality of additive production

by forming competencies in training for high-tech industries. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1515 052065.

3. Chabanenko A. V. and Yastrebov A. P. 2018. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1515 052065.
4. Chabanenko A. V., Kurlov A. V. 2019. Construction of mathematical model of training and professional development of personnel support of additive production of REA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
5. Nazarevich, S.A., Urentsev, A.V., Kurlov, V.V., Balashov, V.M., Rozhkov, N.N. Management of development of basic structures of technological systems of machine-building production (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537 (4), article No. 042024.
6. Чабаненко, А.В. Стандартизация наукоемкой продукции / А.В. Чабаненко // РИА Стандарты и качество. – М., 2015. – № 1. – С. 42 – 47.
7. Гулевитский, А.Ю. Разработка и внедрение системы управления производством инновационной продукции / А.Ю. Гулевитский, А.В. Чабаненко // избранные научные труды: Материалы IVX международного конф. – М., 2015. – С. 159 - 164.
8. Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент) [Электронный ресурс] // Отчет о деятельности организации. – URL: <http://http://www.rupto.ru/> (дата обращения: 10.01.2023).
9. Чабаненко А.В., Рассыхаева М.Д. Оценка пластичности с комбинированным упрочнением для исследования процессов деформирования конструкционных материалов при различных режимах малоцикловых нагружений. – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021619545, 11.06.2021. – Заявка № 2021618914 от 11.06.2021.

QUALIMETRIC QUALITY ASSESSMENT OF ADDITIVE MANUFACTURING DIGITAL TWINS

© 2023 V.A. Tushavin, E.A. Frolova, A.V. Chabanenko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The emergence of “digital twins” was a continuation of the development of the ideas of “digital production” and the concept of the Industrial Internet of Things. Currently, many industrial sectors actively monitor equipment performance data. In recent years, digital transformation has made it possible to not only fully analyze this data using advanced analytics, but also make informed decisions to optimize operations across industries. Such new technologies also allow manufacturers to incorporate digital replicas into their products and processes. New designs can be tested in environmental conditions, saving time, money and resources. A digital twin can significantly speed up physical problem solving, location discovery, and enable the creation of superior products and better customer service. With this intelligent approach, companies can achieve value and benefits much faster than ever before. The development of methods for qualimetry of models should be carried out in parallel in two areas of research, mutually complementing and enriching each other. The first direction of work should focus on the general aspects of qualimetry models and be based on a generalization of the results obtained within the framework of the main models of applied theories of quality assessment and management, which are developed in each subject area (the second direction of research).

Keywords: qualimetry, digital production, modeling, digital prototype, digital twin.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-84-91

EDN: JBNFAC

REFERENCES

1. *Chabanenko A.V., Kurlov A.V.* 2021. Control the quality of polymers based on the model of Dzeno. *Journal of Physics: Conference Series*.
2. *Chabanenko A.V., Kurlov A.V and Tour A.C.* 2020. Model to improve the quality of additive production by forming competencies in training for high-tech industries. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1515 052065.
3. *Chabanenko A.V and Yastrebov A.P.* 2018. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1515 052065.
4. *Chabanenko A.V, Kurlov A.V.* 2019 Construction of mathematical model of training and professional development of personnel support of additive production of REA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
5. *Nazarevich, S.A., Urentsev, A.V., Kurlov, V.V., Balashov, V.M., Rozhkov, N.N.* Management of development of basic structures of technological systems of machine-building production (2019) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537 (4), article No. 042024.
6. *Chabanenko, A.V.* Standartizaciya naukoemkoj produkcii / A.V. Chabanenko // *RIA Standarty i kachestvo*. – M., 2015. – № 1. – S. 42-47.
7. *Gulevitskij, A.Yu.* Razrabotka i vnedrenie sistemy upravleniya proizvodstvom innovacionnoj produkcii / A.Yu. Gulevitskij, A.V. Chabanenko // *Izbrannye nauchnye trudy: Materialy IVX mezhdunar. konf.* – M., 2015. – S. 159-164.
8. Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti (Rospatent) [Elektronnyj resurs] // *Otchet o deyatel'nosti organizacii*. – URL: <http://www.rupto.ru/> (data obrashcheniya: 10.01.2023).
9. *Chabanenko A.V., Rassyhaeva M.D.* Ocenka plastichnosti s kombinirovannym uprochneniem dlya issledovaniya processov deformirovaniya konstrukcionnyh materialov pri razlichnyh rezhimah malociklovyyh nagruzhenij. – *Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2021619545*, 11.06.2021. – Zayavka № 2021618914 ot 11.06.2021.

Vladimir Tushavin, Doctor of Technics, Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems. E-mail: vladimir.a@tushavin.ru

Elena Frolova, Doctor of Technics, Associate Professor, Head of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems. E-mail: frolovaelena@mail.ru

Alexander Chabanenko, Candidate of Technics, Associate Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems. E-mail: a@chabanenko.ru