

АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ДЕФЕКТАМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ОСНОВЕ ДИФфуЗИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Самородова Е.А.

АО «ИЭМЗ «Купол», Москва

Ключевые слова: машиностроение, управление качеством, конструкторская документация, дефекты, диффузионные модели, цифровые технологии, искусственный интеллект.

Аннотация. В статье рассматривается проблема возникновения и накопления дефектов в процессе проектирования и испытаний дорабатываемых моделей и техники в машиностроении. Обоснована актуальность перехода от реактивного управления качеством к проактивному, основанному на прогнозировании и предотвращении ошибок на ранних этапах жизненного цикла изделия. Предложен междисциплинарный подход, использующий аппарат диффузионных моделей и стохастических процессов для формализации процессов зарождения и устранения дефектов в конструкторской документации.

ANALYSIS AND MANAGEMENT OF DEFECTS IN MECHANICAL ENGINEERING BASED ON DIFFUSION MODELS

Samorodova E.A.

АО «IEMZ «Kupol», Moskva

Keywords: engineering, quality management, design documentation, defects, diffusion models, digital technologies, artificial intelligence.

Abstract. The article considers the problem of occurrence and accumulation of defects in the process of design and testing of models and techniques to be developed in mechanical engineering. The relevance of the transition from reactive quality management to proactive, based on forecasting and error prevention in the early stages of the product life cycle is substantiated. An interdisciplinary approach is proposed, using the apparatus of diffuse models and stochastic processes for formalizing processes of origin and elimination of defects in design documentation.

Современное машиностроение функционирует в условиях роста сложности изделий, сокращения сроков разработки и ужесточения требований к качеству и надежности продукции. Традиционные системы управления качеством, применяемые на большинстве предприятий отрасли, носят преимущественно реактивный характер и ориентированы на выявление дефектов на стадиях изготовления или испытаний. Такой подход приводит к значительным финансовым потерям, связанным с браком, простоями оборудования и репутационными рисками.

Особую остроту проблема приобретает на этапе опытного производства, включающего проектирование, изготовление и испытания опытного образца. При выявлении несоответствий на стадии испытаний конструкторская документация (КД) возвращается на доработку, что фактически запускает жизненный цикл изделия заново. Это негативно сказывается как на сроках выполнения проектов, так и на их экономической эффективности. В связи с этим возникает необходимость разработки новых организационно-технических решений, направленных на раннее выявление и предотвращение дефектов.

Процесс согласования КД на машиностроительных предприятиях представляет собой многоэтапную систему проверок с участием различных подразделений, таких как: конструктор-разработчик, ведущий инженер, технологическая экспертиза и т.д. [1]. Каждый из этапов является потенциальным источником ошибок, которые могут накапливаться и трансформироваться в дефекты и брак.

Анализ типичных ошибок показывает их системный характер. Одни и те же недочеты нередко выявляются на разных стадиях проверки, что свидетельствует о влиянии человеческого фактора, недостаточной формализации процессов и слабой интеграции информационных потоков между подразделениями.

Для формализации процессов возникновения и устранения дефектов будет использоваться аппарат диффузионных моделей, широко применяемых в современных методах искусственного интеллекта. Диффузионная модель рассматривает процесс в виде двух взаимосвязанных этапов: прямого и обратного.

Прямой процесс интерпретируется как постепенное внесение «шума» в изначально идеальное состояние проекта. В контексте машиностроения под шумом понимается совокупность случайных и систематических ошибок, возникающих вследствие человеческого фактора, технологических ограничений, информационных и программных искажений. Эти отклонения накапливаются по мере прохождения этапов жизненного цикла изделия [1].

Обратный процесс, напротив, описывает устранение дефектов и восстановление проекта к состоянию, максимально приближенному к идеальному. Контроль качества, анализ причин несоответствий и корректирующие действия в данном случае аналогичны процедуре «очистки» данных от шума в диффузионных моделях.

С математической точки зрения состояние проекта может быть описано в виде многомерного вектора параметров, эволюция которого подчиняется стохастическому дифференциальному уравнению. Дрейфовый член отражает систематические ошибки, тогда как диффузионный член моделирует случайные отклонения. Стандарты (ГОСТ, ОСТ, требования предприятия) в данной модели выступают в роли граничных условий, определяющих область допустимых состояний проекта.

Для строгого описания процессов накопления и устранения дефектов в ходе проектирования и испытаний дорабатываемых моделей и техники используется аппарат стохастических дифференциальных уравнений и уравнение Фоккера–Планка [2,3].

Состояние проекта на этапе жизненного цикла t описывается многомерным вектором состояния $x(t)$, включающим геометрические параметры изделия, свойства материалов, значения допусков, характеристики комплектующих и технологические ограничения. Идеальное состояние проекта обозначим как x_{ideal} .

Эволюция состояния проекта в процессе проектирования может быть представлена в виде стохастического дифференциального уравнения прямого диффузионного процесса:

$$dx = f(x,t)dt + g(t)dw,$$

где $f(x,t)$ – дрейфовый член, описывающий систематические, повторяющиеся ошибки, $g(t)$ – коэффициент диффузии, определяющий интенсивность случайных отклонений на этапе t , dw – винеровский процесс, моделирующий стохастический характер случайных ошибок.

Плотность вероятности состояний проекта $p(x,t)$ при этом подчиняется уравнению Фоккера-Планка:

$$\frac{dp(x,t)}{dt} = -\nabla \cdot (f(x,t), p(x,t)) + \frac{1}{2} \cdot \nabla^2 (g(t) p(x,t)).$$

Данное уравнение описывает процесс размывания начального детерминированного состояния x_{ideal} в распределение возможных состояний проекта, часть которых выходит за пределы допустимых значений и соответствует дефектам и несоответствиям.

Обратный процесс, соответствующий устранению дефектов, формализуется следующим образом:

$$dx = \left[f(x,t) - g(t)^2 \cdot \nabla_x \log p(x,t) \right] dt + g(t) dw.$$

Вектор $\nabla_x \log p(x,t)$ интерпретируется как направление корректирующих воздействий, возвращающих проект к наиболее вероятному и нормативно допустимому состоянию.

Нормативно-техническая документация (ГОСТ, ОСТ, стандарты предприятия) в данной модели выступает в роли граничных условий, ограничивающих допустимую область значений вектора состояния x . Выход распределения $p(x,t)$ за эти пределы интерпретируется как возникновение несоответствия или дефекта.

Таким образом, предложенный подход позволяет комплексно описывать процессы зарождения, накопления и устранения ошибок на протяжении всего жизненного цикла изделия и создает предпосылки для перехода к проактивному управлению качеством в условиях цифровой трансформации промышленности.

Список литературы

1. Самородова Е.А., Муравьева Е.А. Анализ дефектов изделий в машиностроении через призму диффузионной модели // Будущее машиностроения России. Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025.
2. Ho J., Chen X., Srinivas A., Duan Y., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models // arXiv. 2006, p.11239. doi.org/10.48550/arXiv.2006.11239.
3. Li H., Yang Y., Chang M., Feng H., Xu Z., Li Q., Chen Y. SRDiff: Single Image Super-Resolution with Diffusion Probabilistic Models // Neurocomputing. 2021, vol. 479, pp. 47-59.

Сведения об авторе:

Самородова Елизавета Александровна – инженер-конструктор проектно-конструкторского бюро.