

Управление рисками на основе методов диакоптики при синтезе виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия

П.А. Лонцих^a, Е.Ю. Головина^b, Н.П. Лонцих^c, А.В. Федотова^d

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a palon@list.ru, ^b elena_uspeh@mail.ru, ^c natalysib@list.ru, ^d netsela@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7688-3194>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5215-9289>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0453-9156>, ^d <https://orcid.org/0009-0004-5694-1819>

Статья поступила 05.06.2023, принята 18.09.2023

В статье показано, что основой стабильности и качества производимых продуктов или услуг является реализация стандартов ISO 9001:2015 и ISO 31000:2018. Важную роль в минимизации рисков и обеспечении надежности оборудования играют требования стандартов семейства IEEE. Для оценки вероятности рисков технического износа применяется стандарт IEEE 754-2008. Исследования динамических свойств виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия показывают необходимость перехода от сложной технологической системы к упрощенной модели. Современное виброактивное оборудование может подвергаться стационарным и случайным внешним возмущающим воздействиям, и поэтому применение методов робастного проектирования важно в задаче управления рисками. Для синтеза такого оборудования применяется метод диакоптики, который позволяет выполнять анализ динамических свойств сложных механических систем. Однако необходимо постоянно учитывать новые технологические требования и изменения в экономической среде, чтобы успешно управлять рисками и обеспечить высокую надежность производства.

Ключевые слова: риски; высокотехнологичное предприятие; машиностроение; критерии ESG устойчивого развития; стандарты ISO 9001:2015, ISO 31000:2018, IEEE 754-2008, (IEC 60559); вероятность рисков; математическая статистика; уравнения Лагранжа 2-го рода; робастное проектирование; метод диакоптики.

Risk management based on diakoptic methods in the synthesis of vibration-active equipment at a high-tech enterprise

P.A. Lontsikh^a, E.Yu. Golovina^b, N.P. Lontsikh^c, A.V. Fedotova^d

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^a palon@list.ru, ^b elena_uspeh@mail.ru, ^c natalysib@list.ru, ^d netsela@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7688-3194>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5215-9289>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0453-9156>, ^d <https://orcid.org/0009-0004-5694-1819>

Received 05.06.2023, accepted 18.09.2023

The article shows that the basis for the stability and quality of manufactured products or services is the implementation of standards ISO 9001:2015 and ISO 31000:2018. The requirements of standards of the IEEE family play an important role in minimizing risks and ensuring equipment reliability. To assess the risk of possible wear the IEEE 754-2008 standard is used. The study of the properties of vibroactive equipment of a high-tech enterprise is aimed at the transition from an active technological system to a simplified model. Modern vibroactive equipment can be stationary and randomly affecting the impact, therefore, the use of robust design methods is important in risk management problems. For the synthesis of such equipment, the diakoptics method is used, which makes it possible to analyze the dynamic properties of complex mechanical systems. However, it is necessary to constantly take into account new technological requirements and changes in the economic environment in order to successfully manage risks and ensure high production reliability.

Key words: risks; high-tech enterprise; ESG criteria for sustainable development; standards ISO 9001:2015, ISO 31000:2018, IEEE 754-2008, (IEC 60559); risk probability; mathematical statistics; Lagrange equations of the second kind; engineering industry; robust design; diakoptics method.

Мотивация синтеза виброактивного оборудования и стандарты, позволяющие управлять рисками на высокотехнологичных предприятиях. В условиях быстро меняющегося рынка и высоких технологий реализация требований устойчивого развития становится

необходимостью для высокотехнологичных предприятий. Чтобы обеспечить робастность процесса в опасных для бизнеса ситуациях, необходимо разработать систему анализа и управления рисками.

Система менеджмента на основе принципов менеджмента качества и процессного подхода, определенного

международным стандартом ISO 9001:2015, призвана гарантировать стабильность и качество производимых продуктов или услуг. Однако риск наступления возмущающих воздействий на процесс производства может сузить все возможности управления, поэтому необходимо использовать дополнительные инструменты анализа рисков.

Выбранные критерии ESG (*Environmental, Social, Governance*) должны обеспечить робастность процесса, что обусловит его устойчивость в условиях внешних возмущений. Концепция устойчивого развития не только помогает сохранить бизнес в сложных условиях экономической нестабильности, но также улучшает общественное восприятие компании и способствует развитию активных форм взаимодействия компании и ответственности.

Важным моментом является структурирование и анализ найденных рисков, которое обеспечит правильный выбор стратегии управления рисками в соответствии с целями и задачами компании. Более того, решение задачи анализа и управления рисками должно быть частью системы управления качеством и управления изменениями, которая обеспечит взаимосвязь и эффективность средств управления.

Таким образом, анализ и управление рисками в условиях высокотехнологических предприятий должны осуществляться в соответствии с требованиями устойчивого развития и основываться на принципах менеджмента качества и процессного подхода, а также на использовании критериев ESG. Интеграция этих подходов в систему управления компании обеспечит робастность процесса и защиту от негативных внешних воздействий. Очевидно, что каждое высокотехнологическое предприятие имеет свои особенности и потребности, и наличие соответствующего технологического оборудования является необходимым условием для его эффективной работы. Однако важно не забывать о надежности, качестве и долговечности эксплуатации этого оборудования, поскольку это напрямую влияет на успешную реализацию задач предприятия и управление его рисками.

Менеджмент риска — это важный инструмент, который помогает обеспечить устойчивое развитие высокотехнологических предприятий, повысить их эффективность и укрепить надежность национальной безопасности и обороноспособности. Одним из ключевых стандартов, на которых базируется выявление эффективности и требований управления рисками, является международный стандарт ISO 9001:2015, а также стандарты ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines» и ГОСТ РВ 0015-002-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования». Реализация этих стандартов позволяет обеспечить высокую надежность и качество технологического оборудования, а также эффективное управление рисками высокотехнологического предприятия. Современные высокотехнологические предприятия оснащены виброактивным оборудованием, управление которым предполагает оснащение электронными компонентами, что требует минимизации рисков внешних возмущений, обеспечения надежности функционирования как механических параметров оборудования, так и обеспечения надежного функционирования

электронного оборудования. Минимизация рисков и обеспечение надежности такого оборудования во многом определяются требованиями стандартов семейства IEEE. Учет внешних возмущений является одним из факторов создания эффективных методов прогнозирования надежности электронной аппаратуры, которая выполняет функции управления в виброактивных комплексах высокотехнологических предприятий, в том числе — как приведено в анализе применимости инструментов IEEE [1]. Отметим, что именно такие задачи являются одним из направлений деятельности Ассоциации по сертификации «Русский регистр», аккредитованной в органе IECQ для оценки качества электронных компонентов. При этом Ассоциация по сертификации «Русский регистр» — полноправный член IECQ и аккредитована для сертификации по стандартам: IECQ ITNS – ISO 19443 и IECQ HSPM – QC 08000 [2].

Вероятность рисков технического износа оборудования высокотехнологического предприятия, оснащенного электронным оборудованием. Рассмотрим, каким образом надежность, качество и долговечность оборудования высокотехнологического предприятия позволяет выполнить оценку вероятности рисков, определяя влияние виброактивного оборудования, управление которым требует оснащения электронным оборудованием. Методы математической статистики являются неотъемлемой частью современного бизнеса. Они помогают выявлять несоответствия в работе компании и улучшать эффективность процессов согласно требованиям стандарта ISO 9001:2015. Благодаря применению математической статистики можно проводить анализ большого количества данных и выделять закономерности. Это позволяет принимать взвешенные решения, основанные на обоснованных данных и фактах. Одной из основных задач математической статистики является выявление вероятности ошибок и их минимизация. Это особенно важно в современном мире, где каждая ошибка может стоить компании много денег и нанести серьезный ущерб репутации. Таким образом, методы математической статистики обладают огромным потенциалом для различных отраслей бизнеса. Внедрение этих методов позволяет повысить эффективность и результативность процессов, улучшить качество продукции и услуг, а также снизить вероятность ошибок и рисков для компании. Важно подчеркнуть актуальность применимости стандарта IEEE 754-2008 (IEC 60559), т. е. одного из широко используемых стандартов семейства IEEE, описывающих формат представления чисел с плавающей точкой. Этот стандарт, в данном случае, используется для оценки вероятности рисков технического износа, а также адаптации методов математической статистики в программных реализациях арифметических действий и математических операций при реализации методов математической статистики, в том числе диаграмма Парето, методы Тагути [3–5; 23–34].

Как показывает практика, основным риском выхода из строя технологического оборудования на высокотехнологических предприятиях является его износ. Значительно реже причиной аварийного останова оборудования являются как ошибки персонала, так и комбинации некоторых неблагоприятных для работы агрегата факторов.

Одним из ключевых критериев, по которым эксперты оценивают техническое состояние промышленных агрегатов, являются амплитудно-частотные характеристики вибрации. Эти характеристики позволяют измерить и проанализировать вибрацию, которая возникает как от внутренних, так и от внешних факторов. Кроме того, они позволяют детектировать возможные проблемы, связанные с износом деталей и даже предотвратить аварийные ситуации, что делает их неотъемлемой частью технического обслуживания и контроля качества производства. Стоит отметить, что, помимо вибрации, агрегаты могут подвергаться различным другим воздействиям, таким как передача вибрации от соседних машин или воздействие импульсных волн, что также необходимо учитывать при оценке технического состояния оборудования. Это может привести к разнообразным дефектам, опасным для технического состояния объекта. Таким образом, при принятии решений о выводе в ремонт на основании виброданных необходимо учитывать риски будущих вибрационных воздействий на агрегат и предпринимать меры для их предотвращения.

Диагностика технического состояния объекта, интерпретируемая в виде динамической системы, описываемой дифференциальными уравнениями, представляет собой сложный процесс. Она предполагает отслеживание уровня вибрации и изменений структуры технического состояния объекта по мере развития дефектов. Количественные изменения обобщенного показателя вибрации приводят к качественному изменению вибрационного поля — на спектральных диаграммах проявляются характерные для каждого дефекта пики. Оценка качественных признаков, определенных данным дефектом, является ключевым элементом процесса диагностики.

Таким образом, для обеспечения безопасности производственных процессов на предприятии необходимо внимательно следить за изменением вибрационного состояния технологического оборудования и проводить регулярную диагностику его технического состояния на основании виброданных. Это позволит своевременно выявлять и устранять возможные дефекты, предотвращая негативные последствия для производства и обеспечивая его эффективную работу. Вероятность того, что агрегат (или один из его подшипниковых узлов) не будет поврежден ни разу, равна:

$$P[R_o] = \exp(-\lambda_a T) = \exp(-\alpha T_a^{-k}), \quad (1)$$

где $P[R]$ — вероятность события; $T_{ср}$ — наработка на отказ, отношение суммарной длительности работы изделия к числу отказов подшипниковых узлов, возникших за этот период; выражения, стоящие в скобках, определяют параметры возмущающего возмущения.

При этом вероятность того, что некий элемент виброактивного оборудования будет поврежден хотя бы один раз, равна $1-P[R_0]$. В формуле (3) неявно предполагается, что после повреждений агрегат (или его узел) ремонтируется, если необходимо, до такого состояния, при котором уровень его повреждения вновь принимает значение $-a$ [6; 7].

Анализ динамических моделей станка методом диакоптики. Приведение динамической модели станка к модели малой размерности. Оценка рисков работоспособности виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия должна быть основана на информации о динамических характеристиках оборудования. Такое оборудование, в большинстве случаев, имеет сложный состав компонентов, оказывающих неоднородное воздействие на окружающую среду, элементы зданий и сооружений, на человека-оператора. Чаще всего, составить математическую модель некоторой системы, включающей в свой состав такое сложное виброактивное оборудование затруднительно. Для анализа динамических свойств базового оборудования высокотехнологичного предприятия, которым является, прежде всего, виброактивное оборудование, необходимо перейти от сложной технологической системы к упрощенной модели. При проведении механической обработки идеальная динамическая модель технологической системы принимает форму сложной и структурированной иерархии, включающей взаимодействующие элементы и объединенные в блоки подсистемы [6; 9; 15–17]. Каждый блок имеет свою конкретную функцию и является ключевым звеном в работе системы в целом, при этом блоки также информационно связаны и взаимодействуют друг с другом. Таким образом, сложная технологическая система функционирует как целенаправленная организация, обеспечивая эффективную механическую обработку. Это могут быть станок, приспособление, инструменты и заготовки. Хотя отдельные подсистемы могут быть изучены в достаточной мере, получение глобальной модели системы может представляться сложной задачей из-за интегрирующего свойства, характеризующегося сложной структурой связей и многообразием информации во время взаимодействия подсистем. Особое внимание следует уделить структурным особенностям технологической системы. Наиболее важной особенностью являются ее автономность и замкнутость. Несущая система станка взаимодействует с инструментом через систему крепления, придавая инструменту формообразующие движения во время взаимодействия с заготовкой. В процессе этих взаимодействий происходит формообразование обрабатываемого изделия. Заготовка взаимодействует с несущей системой станка через его станочное приспособление. Однако автономность технологической системы не всегда является абсолютной, и в некоторых случаях существует взаимодействие между внешними источниками через фундамент с несущей системой станка. В зависимости от пространства, где происходит рабочий процесс, взаимодействие элементов технологической системы может быть представлено зависимостью силы взаимодействия от смещения элементов [8; 14].

Используя выходные и входные координаты технологической системы и соответствующего рабочего процесса, можно определить смещения элемента. Однако даже такое незначительное смещение может повлиять на динамические характеристики процесса, особенно при наличии внешнего источника энергии. Если энергия, связанная с смещением, не учитывается, она может привести к неуправляемым изменениям динамических

состояний системы. Проведение расчетно-экспериментального метода на основе текущего состояния станка позволяет определить и учесть динамические характеристики несущей системы, которые могут повлиять на результат работы. Однако такая система является принципиально нелинейной, и для ее решения необходимо учитывать природу и характер нелинейностей. В большинстве случаев для решения задач динамики станка достаточно линеаризованной постановки. Важным является приближенное определение границы области устойчивости системы на основе линеаризованной модели, особенно в контексте исключения автоколебательных режимов работы, которые неприемлемы для эксплуатации. Определение оптимальной эквивалентной модели в общем случае является сложным аналитическим решением задачи. Процесс поиска оптимальной эквивалентной модели начинаем с простейшей одномассовой двухконтурной модели. Если при этом условие $\rho(W, \tilde{W}) \leq \varepsilon$ не выполняется, то следует переходить к структурно более сложным моделям.

Оптимальные эквивалентные модели усложняются за счет включения новых обобщенных координат и инерционных блоков. Подбор упругодиссипативных и инерционных характеристик упрощенных моделей осуществляется на основе методов поиска экстремумов в векторных пространствах. Построение эквивалентной упрощенной модели по данной методике позволило определить не только упругие и инерционные параметры упрощенной модели, но и получить значения диссипативных параметров для анализа динамической системы.

Анализ сложной динамической системы и ее расчленение на составляющие. Динамическая система структурно представляет собой множество элементов (звеньев), которые связаны друг с другом направленными связями, а также и множество этих связей [10; 15–17]. Элементы (звенья) взаимодействуют как между собой, так и с окружающей средой. В зависимости от того, отсутствуют ли такие взаимодействия с окружающей средой, существуют в малом или большом числе, системы соответственно разделяются на автономные (замкнутые), сравнительно изолированные и открытые системы. Вопрос о выделении автономной системы как подсистемы некоторой большей системы для независимого анализа ее динамических свойств и решения совокупности задач оптимизационного синтеза является достаточно сложным.

Одним из самых эффективных способов изучения сложных систем является переход от исходной, сложной системы к изучению более простых систем. Таким образом можно точно или приблизительно восстановить свойства исходной системы. Для этого используется диакоптика — разделение сложной системы на относительно изолированные подсистемы. Идея составной динамической системы заключается в том, что при решении задач динамики сложных систем целесообразно разбивать их на более простые компоненты. Это позволяет учитывать критерии, связанные с устойчивостью, быстротой и точностью расчетных алгоритмов, а также необходимыми объемами оперативной памяти для реализации этих алгоритмов с помощью средств вы-

числительной техники. Более того, составные вычислительные схемы дают возможность более глубокого качественного анализа исследуемых сложных систем. Таким образом, разделение сложных систем на относительно изолированные подсистемы — это один из наиболее эффективных способов исследования сложных систем, который позволяет учитывать различные критерии их функционирования и оптимизировать процессы решения задач динамики. Современные научно-технические тенденции, отраженные в теории систем, приводят к непрерывному развитию концепции составных систем [12]. Решение сложных инженерных задач, связанных с анализом и проектированием машиностроительной техники, является сложным и многогранным процессом, требующим индивидуального подхода к каждому элементу. Среди ключевых элементов машиностроительной техники можно выделить развитые машинные агрегаты, главные приводы конвейерных установок, сложные трубопроводные системы, оболочечные конструкции и другие элементы. Одной из главных проблем при проектировании сложных технических систем является необходимость решения задач, для которых прямой метод не может обеспечить достаточную точность в приемлемые сроки. Использование эффективных информационных технологий, которые позволяют решать задачи с высокой точностью и быстродействием, является необходимостью. В этом контексте широко используется концепция составной динамической системы, основанная на цифровом подходе, что позволяет моделировать сложные технические системы с эффективностью и точностью. При моделировании сложных систем также часто используется дискретно-непрерывные расчетные модели, а для решения задач динамики управляемых механических систем применяется декомпозиционный подход. Это предполагает рассмотрение каждой системы как совокупности управляемых и неуправляемых подсистем, схематизация которых базируется на разнородных динамических моделях. Такой подход позволяет существенно сократить многомерную задачу и свести ее к комбинации задач с меньшей размерностью. Применение упомянутых методов дает эффективный результат при решении задач динамики станочных систем, проектируемых на основе агрегатно-модульных принципов. Декомпозиционный подход, применяемый при проектно-конструкторских разработках, находит свое продолжение в анализе и синтезе динамических характеристик сложных систем. Это позволяет более точно рассчитывать характеристики систем и оптимизировать их работу. В целом эффективное решение сложных инженерных задач требует использования современных информационных технологий и индивидуального подхода к каждому элементу системы. Для того чтобы успешно реализовать подход к анализу и проектированию машиностроительных систем, необходимо иметь эффективные методы построения характеристик исходной системы на основе локальных характеристик ее подсистем. Данные методы используют принципы составной динамической системы и декомпозиционные подходы к решению задач динамики управляемых механических систем. Такой подход позволяет успешно решать сложные инженерные задачи, связанные с проектированием машинных агрегатов, главных приводов

конвейерных установок, сложных трубопроводных систем и других элементов машиностроительной техники. Каждая подсистема решается с помощью наиболее эффективных алгоритмов, что оптимизирует процесс проектирования и повышает его результативность. Организация параллельных вычислений является дополнительным преимуществом декомпозиционного подхода. Данный метод также основывается на использовании нормальных координат консервативных моделей подсистем, что позволяет учитывать множество эффектов при ограниченном возбуждении в колебательных системах. Методы декомпозиции подразумевают определение локальных собственных спектров подсистем, которые могут быть получены с помощью расчетных или экспериментальных данных. Эти спектры затем используются для составления унифицированных характеристик типовых агрегатов и узлов. Агрегация метасистемы из локальных решений происходит с использованием Лагранжева формализма с неопределенными множителями. Такой подход позволяет повысить эффективность и результативность проектирования машиностроительных систем благодаря использованию наиболее оптимальных методов решения задач каждой конкретной подсистемы. Целесообразность декомпозиционных подходов сохраняется и при использовании неканонических моделей подсистем, при этом рациональный метод агрегирования может быть представлен процедурой Крона для расчета обратной динамической матрицы метасистемы. Использование канонического представления подсистем позволяет получать агрегированные модели метасистем для широкого многообразия исходных составных моделей, которые принадлежат к унифицированному классу динамических структур с упорядоченной разреженностью. В целом декомпозиционный подход является перспективной методикой для решения задач динамики сложных систем, особенно в условиях необходимости варьирования параметров каждой подсистемы и использования параллельных вычислений. Давайте рассмотрим процесс создания динамической модели горизонтально-фрезерного станка (см. рис.). На этом рисунке твердое тело с массой представляет собой подсистему, которая состоит из элементов «консоль – стол – заготовка». Более того, мы можем увидеть упругий элемент с коэффициентом жесткости, который отображает жесткость шпиндельного узла. Элементы с коэффициентами жесткости K_1 и K_2 — это жесткости стыков и стоек, которые связывают консоль со станиной станка. Однако самое интересное то, что сила резания F в процессе исследования вынужденных колебаний станка лежит в плоскости чертежа и направлена под углом α к вертикальной оси. Это условие дает нам больше информации о процессе обработки и позволяет более точно определить характеристики станка. Также можно отметить, что в процессе создания динамической модели мы будем использовать различные математические методы, которые позволят преобразовать все физические процессы в численные значения. Кроме того, рассмотрение и анализ таких моделей может помочь инженерам и конструкторам совершенствовать и улучшать процессы обработки материалов на станках, что в конечном итоге приведет к улучшению качества и производительности продукции (рис. 1, б).

Кинетическую энергию определим в соответствии с теоремой Кенига. Потенциальную энергию каждого упругого элемента определим в функции коэффициентов жесткости упругих элементов и деформации этих элементов.

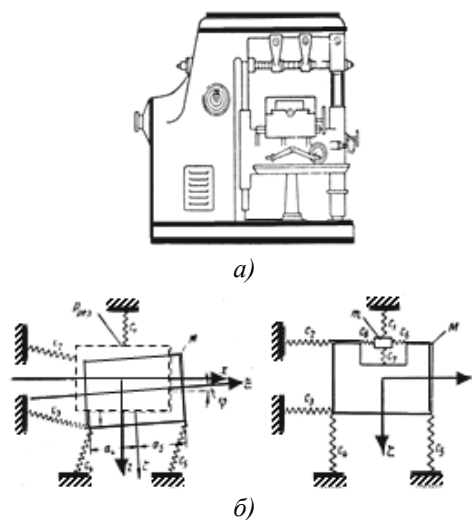


Рис. Горизонтально-фрезерный станок (а) и упрощенная схема (б)

На основании уравнений Лагранжа 2-го рода [12] получим систему дифференциальных уравнений (2):

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + (c_2 + c_3)x + (c_3h_3 - c_2h_2)\varphi &= P \sin \alpha; \\ M\ddot{z} + (c_1 + c_4 + c_5)z + (c_4a_4 - c_5a_5)\varphi &= P \cos \alpha; \\ J_n\ddot{\varphi} + (c_2h_2^2 + c_3h_3^2 + c_4a_4^2 + c_5a_5^2)\varphi + \\ + (c_3h_3 - c_2h_2)x + (c_4a_4 - c_5a_5)z &= -Ph_p \sin \alpha, \end{aligned} \quad (2)$$

где M , c — инерционные и жесткостные характеристики механической колебательной системы; P_i — проекции силы на выбранные оси координат; J_i — моменты инерции; h_i — плечо соответствующей силы при определении моментов сил; x , y , z — координаты относительно выбранных осей; c_i — жесткостные коэффициенты.

Дифференциальные уравнения (2) образуют математическую модель механических движений фрезерного станка.

Эта модель является основой для анализа системы на низшем уровне и известна своими упрощениями. Важным ограничением ее использования является то, что она не учитывает диссипативные свойства соединений. Тем не менее, в ряде случаев модель может быть полезна, например, при определении собственных частот или исключении резонансных зон. Если требуется решить задачи, связанные с более сложной системой, можно использовать подход, основанный на решении дифференциальных уравнений. Таким образом, с помощью улучшенных методов можно достичь более точных результатов и более глубокого понимания системы в целом. В целом, использование этой модели требует тщательной оценки потенциальных ограничений и применения соответствующих методов анализа. Это может быть как аналитическое решение, так и численный метод для многомерных нелинейных систем. Метод диакоптики также может быть эффективным в данном случае.

Заключение. Исследования показывают, что для анализа динамических свойств виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия необходимо перейти от сложной технологической системы к упрощенной модели. Это можно достигнуть с помощью метода диакоптики, который позволяет разбить многомерную систему на более простые парциальные системы. В условиях высокотехнологичного предприятия виброактивное оборудование подвергается случайным внешним воздействиям и импульсным возмущениям, что вносит неопределенность на различных иерархических уровнях виброактивной системы. Для управления рисками функционирования виброактивного оборудования на высокотехнологичных предприятиях используются стандарты ISO 9001:2015 и ISO 31000:2018. Оценка вероятности рисков производится на основе стандарта IEEE 754-2008, (IEC 60559). Разработанная методика, основанная на применении метода диакоптики, является эффективным инструментом для проведения робастного параметрического проектирования технологических процессов. Она позволяет решать оптимизационные задачи с использованием виброактивного оборудования, а также повышает устойчивость процесса к возмущающим воздействиям и минимизирует риски. Одной из основных целей проектирования технологического процесса, в который вовлечено виброактивное оборудование, является обеспечение необходимого качества изделия. Однако целевой критерий функционирования

зависит от параметров управления, структуры процесса и возмущающих факторов. Анализ динамических составляющих осуществляется с использованием метода диакоптики, который позволяет определять связи между различными компонентами технологического процесса и оценивать их влияние на целевой критерий. В результате проведенного анализа формулируются предложения по изменению параметров управления и структуры процесса, что позволяет достичь требуемого уровня качества продукции. Основным требованием к целевому критерию является его робастность, т. е. способность устойчиво функционировать при возможных изменениях параметров. Это позволяет снизить риск возникновения сбоев и неисправностей во время производственного процесса. Таким образом, методика, основанная на методе диакоптики, позволяет эффективно проводить параметрическое проектирование технологических процессов с использованием виброактивного оборудования. Она позволяет достичь требуемого уровня качества продукции, снизить риски возникновения сбоев и неисправностей во время производственного процесса. Стандарт ГОСТ Р ИСО 16336-2020 «Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD)» обосновывает использование робастного подхода в проектировании технологических процессов.

Литература

1. IEEE, IEEE guide for selecting and using reliability predictions based on iecq 1413, 2003. 90 p.
2. Аккредитация pp как ос iecq: «Сертификат IEC Quality Assessment System for Electronic Component. Certificate of Membership... «Russian Register».
3. Стандарт IEEE 754-2008 (IEC 60559) [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_754-2008 (дата обращения: 19.09.2023).
4. Материалы Совещания IEEE, март 2023г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/net4/wsis/forum/2023/ru/Agenda/Session/179>
5. Pawel A. Lontsikh, Elena Y. Golovina, Malika V. Evloeva, Pya I. Livshitz, Andrey V. Koksharov. Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods 2022 International Conference on Quality Management, (IT&QM&IS), Year: 2022. Conference Paper. Publisher: IEEE.
6. Азаров В.Н., Меох Л.Ю. Интегрированные информационные СМК. М.: Европейский центр по качеству, 2002. 64 с.
7. Семенова Е.Е. Актуальные проблемы риска- в России // Инновационная наука. 2015. № 6. С. 54-56.
8. Ивнова В.А., Поздняк Э.Г. Основы мат анализа: в 2-х ч. М.: Физматлит, 2014. Ч. 1. 648 с.
9. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / отв. ред. Л.Б. Зуев. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 235 с.
10. Вейц В.Л., Мазурова П.В., Лончих П.А. Структурированные модели и методы расчета сложных управляемых систем в технике и экономике. Ростов н/Д., 2002. 200 с.
11. Лончих П.А. Обеспечение качества и управление динамическими процессами технологических систем. Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2003. С. 236.
12. Лончих П.А., Шулешко А.Н. Защита технологических машиностроительных систем и оборудования от вибраций и ударов. Иркутск, 2002. 178 с.
13. Базин С.А., Киселева Т.П. Анализ видов и последствий потенциальных отказов процесса производства метизных изделий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2/3 (286). С. 128-132.
14. Чичко А.Н., Феклистова Л.А., Соболев В.Ф. О новом подходе к оценке вкладов различных этапов технологического цикла в систему контроля качества метизной продукции // Литье и металлургия. 2009. № 3. С. 50-56.
15. Михайловский И.А., Гун Е.И. Анализ качества автомобильных компонентов и используемых в процессе их производства операций ОМД путем иерархической декомпозиции качества // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2014. № 10-1. С. 143-149.
16. Корчевина И.А., Гун Е.И. Учет производственных рисков при анализе путем иерархической декомпозиции качества // Качество в обработке материалов. 2014. № 2 (2). С. 33-38.
17. Новикова А.В., Кабулова Е.Г. Управление многостадийными системами машиностроительного производства // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 1. С. 341-351.
18. Кабулова Е.Г. Модель интеграции разнородной информации при управлении сложными технологическими системами в условиях неопределенности // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. 2018. Т. 22. № 4. С. 104-111.
19. Брагин Ю.В. Идея робастного проектирования // Методы менеджмента качества. 2006. № 12. С. 18-24.
20. Брагин Ю.В. Робастная оптимизация производственного процесса // Методы менеджмента качества. 2007. № 3. С. 35-41.
21. Брагин Ю.В. Сопоставление традиционного и робастного подходов к проектированию // Методы менеджмента качества. 2007. № 2. С. 8-12.
22. Базылева Н.З., Панов Р.А., Можиль А.Ф., Володькин М.С., Богачев И.А., Шурупов Н.Д. Робастный подход к логистическому инжинирингу на этапах концептуального

- проектирования // Нефтяное хозяйство. 2019. № 1. С. 104-108.
23. Taguchi G., Chowdhury S., Wu. Taguchi's Y. Quality Engineering Handbook. New Jersey, Hoboken, 2005. 1629 p.
 24. Abdul Razak Kaladgi, Asif Afzal, A. Muthu Manokar, Deepak Thakur, Umit Agbulut, Saad Al shahrani, Ahamed Saleel C, Ram Subbiah. Integrated Taguchi-GRA-RSM optimization and ANN modelling of the performance of zinc oxide nanofluids in an automobile radiator // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 26. P. 101068.
 25. Durairaj M., Sudharsun D., Swamynathan N. Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade // Procedia Engineering. 2013. V. 64. P. 868-877.
 26. Balaji M., Murthy B.S.N., Rao N. Mohan. Optimization of Cutting Parameters in Drilling of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA // Procedia Technology. 2016. V. 25. P. 1106-1113.
 27. Albetran H., Dong Y., Low I.M. Characterization and optimization of electrospun TiO₂/PVP nanofibers using Taguchi design of experiment method // Journal of Asian Ceramic Societies. September 2015. V. 3., iss. 3. P. 292-300.
 28. Xavier Sánchez-Sánchez, Alex Elias-Zuñiga, Marcelo Hernández-Avila. Processing of ultra-high molecular weight polyethylene/graphite composites by ultrasonic injection moulding: Taguchi optimization // Ultrasonics Sonochemistry. June 2018. V. 44. P. 350-358.
 29. Chrispin Das Mohan Das, Athijayamani Ayyanar, Sidhardhan Susaiyappan, Ramanathan Kalimuthu. Analysis of the effects of fabrication parameters on the mechanical properties of Arca fine fiber-reinforced phenol formaldehyde composite using Taguchi technique // Journal of Applied Research and Technology. 2017. V. 15, iss. 4. P. 365-370.
 30. Bharath P., Sridhar V.G., Senthil kumar M. Optimization of 316 Stainless Steel Weld Joint Characteristics using Taguchi Technique // Procedia Engineering. 2014. V. 97. P. 881-891.
 31. Brajesh Kumar Lodhi, Sanjay Agarwal. Optimization of Machining Parameters in WEDM of AISI D3 Steel Using Taguchi Technique // Procedia CIRP. 2014. V. 14. P. 194-199.
 32. Vaishal Banker J., Jitendra M. Mistry, Malhar R.Thakor, Bhargav H. Upadhyay. Wear Behavior in Dry Sliding of Inconel 600 Alloy Using Taguchi Method and Regression Analysis // Procedia Technology. 2016. V. 23. P. 383-390.
 33. Zulfiqar Ali Raza, Naseer Ahmad, Shahid Kamal. Multi-response optimization of rhamnolipid production using grey rational analysis in Taguchi method // Biotechnology Reports. September 2014. V. 3.
 34. Hashim Hanizam, Mohd Shukor Salleh, Mohd Zaidi Omar, Abu Bakar Sulong. Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes - aluminium alloy composite through Taguchi method // Journal of Materials Research and Technology. April 2019. V. 8, iss. 2. P. 223-2231.
- References*
1. IEEE, IEEE guide for selecting and using reliability predictions based on IEEE 1413, 2003. 90 p.
 2. RR ACCREDITATION AS IECQ OS: "IEC Quality Assessment System for Electronic Component Certificate. Certificate of Membership... "Russian Register".
 3. Standard IEEE 754-2008 (IEC 60559) [Elektronnyj resurs]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_754-2008 (data obrashcheniya: 19.09.2023).
 4. Proceedings of the IEEE Meeting, mart 2023g. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.itu.int/net4/wsis/forum/2023/ru/Agenda/Session/179>
 5. Pawel A. Lontsikh, Elena Y. Golovina, Malika V. Evloeva, Ilya I. Livshitz, Andrey V. Koksharov. Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods 2022 International Conference on Quality Management, (IT&QM&IS), Year: 2022. Conference Paper. Publisher: IEEE.
 6. Azarov V.N., Meoh L.YU. Integrated information QMS. M.: Evropejskij centr po kachestvu, 2002. 64 p.
 7. Semenova E.E. Actual problems of risk in Russia // Innovation science. 2015. № 6. P. 54-56.
 8. Ivnova V.A., Pozdnyak E.G. Fundamentals of Math Analysis: v 2-h ch. M.: Fizmatlit, 2014. CH. 1. 648 p.
 9. Nonlinear mechanics of geomaterials and geomechanics / otv. red. L.B. Zuev. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2007. 235 p.
 10. Vejc V.L., Mazurova P.V., Loncch P.A. Structured models and methods for calculating complex control systems in engineering and economics. Rostov n/D., 2002. 200 p.
 11. Loncch P.A. Quality assurance and control of dynamic processes of technological systems. Rostov n/D.: Izd-vo Rost. unta, 2003. P. 236.
 12. Loncch P.A., SHuleshko A.N. Protection of technological machine-building systems and equipment from vibrations and shocks. Irkutsk, 2002. 178 p.
 13. Bazin S.A., Kiseleva T.P. Analysis of the types and consequences of potential failures in the production of hardware products // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2011. № 2/3 (286). P. 128-132.
 14. CHichko A.N., Feklistova L.A., Sobolev V.F. On a new approach to assessing the contributions of various stages of the technological cycle to the quality control system of hardware products // Foundry production and metallurgy. 2009. № 3. P. 50-56.
 15. Mihajlovskij I.A., Gun E.I. Analysis of the quality of automotive components and OMD operations used in the process of their production by hierarchical decomposition of quality // Izvestija TulGU. Technical sciences. 2014. № 10-1. P. 143-149.
 16. Korchevina I.A., Gun E.I. Accounting for production risks in the analysis by hierarchical decomposition of quality // Kachestvo v obrabotke materialov. 2014. № 2 (2). P. 33-38.
 17. Novikova A.V., Kabulova E.G. Management of multi-stage systems of machine-building production // Modeling, optimization and information technology (MOIT). 2019. V. 7. № 1. P. 341-351.
 18. Kabulova E.G. A model for the integration of heterogeneous information in the management of complex technological systems under uncertainty // Proceedings of the southwest state university. 2018. V. 22. № 4. P. 104-111.
 19. Bragin YU.V. The idea of robust design // Metody menedzhmenta kachestva. 2006. № 12. P. 18-24.
 20. Bragin YU.V. Robust optimization of the production process // Metody menedzhmenta kachestva. 2007. № 3. P. 35-41.
 21. Bragin YU.V. Comparison of traditional and robust design approaches // Metody menedzhmenta kachestva. 2007. № 2. P. 8-12.
 22. Bazyleva N.Z., Panov R.A., Mozhchil' A.F., Volod'kin M.S., Bogachev I.A., SHurupov N.D. Robust approach to logistics engineering at the stages of conceptual design // Oil industry. 2019. № 1. P. 104-108.
 23. Taguchi G., Chowdhury S., Wu. Taguchi's Y. Quality Engineering Handbook. New Jersey, Hoboken, 2005. 1629 p.
 24. Abdul Razak Kaladgi, Asif Afzal, A. Muthu Manokar, Deepak Thakur, Umit Agbulut, Saad Al shahrani, Ahamed Saleel C, Ram Subbiah. Integrated Taguchi-GRA-RSM optimization and ANN modelling of the performance of zinc oxide nanofluids in an automobile radiator // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. V. 26. P. 101068.
 25. Durairaj M., Sudharsun D., Swamynathan N. Analysis of Process Parameters in Wire EDM with Stainless Steel using Single Objective Taguchi Method and Multi Objective Grey Relational Grade // Procedia Engineering. 2013. V. 64. P. 868-877.

26. Balaji M., Murthy B.S.N., Rao N. Mohan. Optimization of Cutting Parameters in Drilling of AISI 304 Stainless Steel Using Taguchi and ANOVA // *Procedia Technology*. 2016. V. 25. P. 1106-1113.
27. Albetran N., Dong Y., Low I.M. Characterization and optimization of electrospun TiO₂/PVP nanofibers using Taguchi design of experiment method // *Journal of Asian Ceramic Societies*. September 2015. V. 3., iss. 3. P. 292-300.
28. Xavier Sánchez-Sánchez, Alex Elias-Zuñiga, Marcelo Hernández-Avila. Processing of ultra-high molecular weight polyethylene/graphite composites by ultrasonic injection moulding: Taguchi optimization // *Ultrasonics Sonochemistry*. June 2018. V. 44. P. 350-358.
29. Chrispin Das Mohan Das, Athijayamani Ayyanar, Sidhardhan Susaiyappan, Ramanathan Kalimuthu. Analysis of the effects of fabrication parameters on the mechanical properties of Arca fine fiber-reinforced phenol formaldehyde composite using Taguchi technique // *Journal of Applied Research and Technology*. 2017. V. 15, iss. 4. P. 365-370.
30. Bharath P., Sridhar V.G., Senthil kumar M. Optimization of 316 Stainless Steel Weld Joint Characteristics using Taguchi Technique // *Procedia Engineering*. 2014. V. 97. P. 881-891.
31. Brajesh Kumar Lodhi, San jayAgarwal. Optimization of Machining Parameters in WEDM of AISI D3 Steel Using Taguchi Technique // *Procedia CIRP*. 2014. V. 14. P. 194-199.
32. Vaishal Banker J., Jitendra M. Mistry, Malhar R.Thakor, Bhargav H. Upadhyay. Wear Behavior in Dry Sliding of Inconel 600 Alloy Using Taguchi Method and Regression Analysis // *Procedia Technology*. 2016. V. 23. P. 383-390.
33. Zulfiqar Ali Raza, Naseer Ahmad, Shahid Kamal. Multi-response optimization of rhamnolipid production using grey rational analysis in Taguchi method // *Biotechnology Reports*. September 2014. V. 3.
34. Hashim Hanizam, Mohd Shukor Salleh, Mohd Zaidi Omar, Abu Bakar Sulong. Optimisation of mechanical stir casting parameters for fabrication of carbon nanotubes - aluminium alloy composite through Taguchi method // *Journal of Materials Research and Technology*. April 2019. V. 8, iss. 2. P. 223-2231.