

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 65.011.56
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180



МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ, ОСНАЩЕННОМ ВИБРОАКТИВНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Лонцих П.А.¹, Головина Е.Ю.¹, Лонцих Н.П.¹, Лившиц И.И.²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты применимости методов и инструментов управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием. Показано, что определение условий эффективности и принципов управления рисками на таких предприятиях основывается на ключевых требованиях, установленных в международных стандартах менеджмента качества. Применение метода диакоптики позволило привести исходную математическую или динамическую модель к модели малой размерности и оценить риски работоспособности виброактивного оборудования на высокотехнологичном предприятии. Анализ динамических свойств оборудования потребовал перехода от сложной технологической системы к упрощённой модели, которую можно разделить на относительно изолированные подсистемы с помощью метода диакоптики. Это предоставило возможность идентифицировать возможные риски. Установлено, что использование данного подхода оказывает влияние на повышение качества изделий, на минимизацию рисков, на сокращение сбоев и в целом на улучшение производственного процесса. Успехом минимизации рисков и повышения безопасности на производстве машиностроительной отрасли является контроль за изменениями вибрационного состояния технологического оборудования и осуществление его своевременной диагностики. Данные мероприятия позволяют своевременно выявить потенциальные проблемы и принять необходимые меры для их предотвращения. Ограничиваясь анализом вероятности технического износа оборудования на машиностроительном предприятии как одного из критически важных факторов для обеспечения эффективной работы, в статье выдвигаются инновационные принципы реализации синтеза методов и инструментов для снижения рисков, связанных с вибрационно-активным оборудованием. Это обуславливает неотложность исследований динамических процессов, происходящих на высокотехнологичном оборудовании машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: высокотехнологичные предприятия, управление рисками, виброактивное оборудование, стандарты системы менеджмента качества, цикла Деминга, метод диакоптики

© Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Лившиц И.И., 2024

Для цитирования

Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием / Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Лившиц И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODS AND TOOLS OF RISK MANAGEMENT AT A HIGH-TECH MACHINE-BUILDING ENTERPRISE WITH VIBRATION ACTIVE EQUIPMENT

Lontsikh P.A.¹, Golovina E.Yu.¹, Lontsikh N.P.¹, Livshits I.I.²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article describes the results of applicability of risk management methods and tools at a high-tech machine-building enterprise with vibration active equipment and shows that the efficiency conditions and the principles of risk management applied at such enterprises are based on key requirements established in the international quality management standards. By applying the diakoptics method, the authors brought the original mathematical or dynamic model to a low-dimensional model and assessed the performance risks for vibration active equipment used at a high-tech enterprise. The analysis of the dynamic properties of equipment required a transition from a complex technological system to a simplified model, which could be divided into relatively isolated subsystems using the diakoptics method. This transition provided an opportunity to identify potential risks. This approach was found to have an impact on improving the product quality, minimizing risks, reducing failures, and improving the production process in general. The success of minimizing risks and improving safety at machine-building plants is an opportunity to monitor changes in the vibration state of process equipment and perform timely diagnostics. These measures can make it possible to identify potential problems and take preventive measures. Limited to the analysis of the probability of technical wear of equipment at the machine-building enterprise as one of the critical factors for improving its performance, the article puts forward innovative principles for implementing a synthesis of methods and tools intended to reduce risks of vibration active equipment. This fact determines the urgency of research into dynamic processes that occur on high-tech equipment used at machine-building enterprises.

Keywords: high-tech enterprises, risk management, vibration active equipment, quality management system standards, Deming cycle, diakoptics method

For citation

Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I. Methods and Tools of Risk Management at a High-Tech Machine-Building Enterprise with Vibration Active Equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>

Введение

Развитие экономики в России в значительной степени обусловлено прогрессом предприятий высокопроизводительных и наукоемких секторов. Эта область экономики, вне всякого сомнения, играет одну из ключевых ролей в современном производстве, поскольку её развитие определяет обеспечение конкурентоспособности национальной экономики. Успехи экономики и научно-технического прогресса напрямую зависят от результативности функционирования высокотехнологичных предприятий. Согласно классификации Росстата [1, 2], основанной на методологии Евростата, данная отрасль включает следующие производства (в скобках указан код ОКВЭД):

– (26). Производство компьютеров, электронных и оптических изделий;

– (30.3). Производство летательных аппаратов, включая космическое оборудование.

Стоит отметить, по данным статистики, в Евросоюзе на долю, кто занят в сфере высоких технологий, приходится впечатляющие 45,8%, что свидетельствует о значительной концентрации экспертов и специалистов в данной области. Однако в России

данная доля составляет 34,3%, что требует дополнительных усилий для увеличения конкурентоспособности и развития высокотехнологичных отраслей. Более того, Россия экспортирует менее 0,5% от общего объема высокотехнологичной продукции в мире, и это в основном связано с областью военных технологий. В то же время доля импорта высокотехнологичных товаров в России превышает 60% [2].

При анализе деятельности высокотехнологичных предприятий используются такие подходы, как отраслевой, продуктовый, патентный и параметрический. Существует четыре ключевых характеристики высокотехнологичных проектов гражданского назначения: новизна, сложность организации, сложность технологии и скорость выполнения [3]. В соответствии с паспортом научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции», важными областями исследования являются следующие направления исследования: 7. Управление рисками и предотвращение несоответствий в технических и организационных системах; 10. Развитие методов потребительской оценки качества продукции и услуг для высокотехнологичных отраслей производства; 13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управ-

ления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов [13]. В данном исследовании представлены результаты применения методов и инструментов управления рисками в высокотехнологичном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием.

Определение условий эффективности и принципов управления рисками на предприятиях высоких технологий основывается на ключевых требованиях, установленных в международных стандартах ISO 9001:2015, Quality management systems – Requirements, ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines», а также в национальном стандарте ГОСТ РВ 0015-002-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования» [4-6]. Эти стандарты устанавливают требования к качеству системы управления и обеспечению высокого качества продукции. Решение о внедрении системы управления качеством является стратегически значимым для любой организации и способно существенно улучшить результаты ее работы, а также обеспечить прочную базу для проектов, направленных на поддержание устойчивого развития [4, 20].

Для достижения максимальной эффективности системы управления в соответствии со стандартом ISO 9001:2015 необходимо использовать процессно-ориентированный подход. Этот подход предполагает разработку и внедрение системы управления на предприятии с учетом его специфики, а также постоянную работу над улучшением эффективности системы менеджмента качества и повышения удовлетворенности заинтересованных сторон. Данный стандарт определяет требования к построению процессов на основе цикла Деминга (PDCA), который предполагает постоянное совершенствование процессов, определяющих деятельность предприятий. Особое внимание уделяется риск-ориентированному подходу, который направлен на предотвращение нежелательных последствий и использование возможностей для улучшения деятельности организации [4].

Стандарт ISO 31000:2018 определяет требования к управлению рисками и включает систематическую работу с рисками, начиная от их идентификации и заканчивая контролем и отчетностью. Он предусматривает использование различных методов и инструментов для управления рисками, включая коммуникации, консультирование, оценку рисков и обработку информации о рисках [5]. При анализе рисков на высокотехнологичном предприятии следует учитывать технические и технологические риски, связанные с износом оборудования и сложностью производственных процессов. Вероятность возникновения таких рисков является ключевым фактором при принятии решений о внедрении новых технологий и модернизации оборудования.

Анализ и управление рисками на высокотехнологичных предприятиях должны проводиться с учетом требований устойчивого развития и базироваться на принципах системы менеджмента качества и про-

цессном подходе. Такие предприятия, как правило, оснащены виброактивной техникой, управление которой требует использования электронных компонентов. Чтобы обеспечить надежность использования высокотехнологичного оборудования, необходимо учитывать внешние воздействия и минимизировать риски. Это важно как для механических компонентов, так и для электронного оборудования. Стоит отметить, изучение влияния внешних факторов играет очень важную роль в создании новейших подходов к прогнозированию надежности технологий, особенно это важно в условиях управления виброактивными комплексами на предприятиях, характеризующихся высокой технологичностью производственных процессов [7-12].

Вероятность технических рисков оборудования высокотехнологичного предприятия

Критерии надежности и долговечности оборудования на высокотехнологичных предприятиях позволяют оценить вероятность технических рисков, связанных с износом виброактивного оборудования. Матстатистика на сегодняшний день играет ключевую и важнейшую роль, так как благодаря ей возможно с легкостью выявить несоответствия и повысить эффективность работы в соответствии с требованиями ISO 9001:2015. Это помогает анализировать данные, делать выводы и принимать обоснованные решения на основе статистических методов и моделей. Одним из основных направлений математической статистики является оценка вероятности ошибок и разработка мер по их уменьшению. Использование методов математической статистики может значительно повысить эффективность и результативность работы, улучшить качество продукции и снизить вероятность ошибок. Практика показывает, что основным риском для технологического оборудования является износ, тогда как ошибки персонала и внешние факторы вызывают аварийные остановки гораздо реже. Одним из показателей, используемых для оценки технического состояния оборудования, является уровень вибраций, источником которых могут являться как внутренние, так и внешние возмущения. Таким образом, общее вибрационное воздействие на агрегат может быть представлено следующим образом:

$$S = S^{\text{собств}} + S^{\text{фоновое}} + S^*, \quad (1)$$

где $S^{\text{собств}}$ – собственная вибрация агрегата; $S^{\text{фоновое}}$ – фоновая вибрация в районе размещения агрегата, которая может быть замерена при его отключении; S^* – случайная вибрация.

Если величина $S^{\text{собств}}$ является вполне предсказуемой при наблюдении за агрегатом, то величины $S^{\text{фоновое}}$ и S^* – случайные. Из этого следует, что сам процесс по принятию соответствующего решения о ремонте виброактивного оборудования осуществляется на основе данных о вибрации и предполагает оценку рис-

ков, связанных с возможным неблагоприятным поведением оборудования в результате воздействия вибрации. Суммарный риск представляет собой совокупное воздействие различных вибрационных явлений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации, а также реакцию оборудования на эти явления [14, 15].

Общее выражение для определения суммарного риска может быть записано следующим образом:

$$P[R_i] = \sum_j P[R_i / S_j] P[S_j], \quad (2)$$

где $P[R]$ – вероятность события, указанного в квадратных скобках; R_i – событие, состоящее в том, что система находится в i -м состоянии; S_j означает, что испытываемое на входе вибрационное воздействие имеет «уровень» j ; $P[R_i / S_j]$ означает вероятность того, что состояние системы будет R_i при условии, что имеет место вибрационный вход S_j .

В процессе своей эксплуатации объект диагностики, который рассматривается как динамическая система и описывается дифференциальными уравнениями, обладает свойством изменения уровня вибрации. Данное изменение спровоцировано наличием дефектов или положением фазы их развития. Каждый из имеющихся дефектов оказывает влияние на структуру технического состояния объекта, так как даже небольшое количественное изменение обобщенного показателя вибрации вызывает качественное изменение всего вибрационного поля.

С целью определения наличия дефектов и их типа используются спектральные диаграммы. На этих диаграммах появляются пики, которые характерны для определенного вида дефекта.

Таким образом, объект диагностики, рассматриваемый как динамическая система, имеет различный уровень вибрации в процессе своей эксплуатации, который объясняется наличием дефектов. Использование спектральных диаграмм позволяет определить тип и характер имеющегося дефекта на основе характеристик вибрационного поля. Данные мероприятия помогают контролировать состояние объекта и оценивать его техническое состояние. Вероятность того, что риск сохранения работоспособности агрегата (или один из его узлов) не будет поврежден ни разу, рассчитывается по следующей формуле:

$$P[R_0] = \exp(-\lambda_a T) = \exp(-\alpha T_a^{-k}), \quad (3)$$

где $P[R_0]$ – вероятность события; T – 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 следует учитывать, что вероятность возникновения риска повреждения элемента виброактивного оборудования зависит от значения $P[R_0]$. Если

данная вероятность низкая, то существует меньший риск повреждения, а если она высокая, то вероятность повреждения также возрастает. В формуле (3) указывается, что после возникновения повреждений агрегат или его узел подвергаются ремонту, если это необходимо, чтобы вернуться к состоянию, при котором уровень повреждения снова становится равным α . Таким образом, проведение ремонтных работ позволяет восстановить работоспособность оборудования и минимизировать риск повторного повреждения.

Данная концепция ремонта и поддержания работоспособности виброактивного оборудования основана на исследованиях и практическом опыте. Использование данной методологии позволяет эффективно управлять рисками повреждений и обеспечить надежную работу оборудования [15-17].

Анализ динамических моделей станка методом диакоптики

В статье [17] мы обосновали проведение анализа динамических моделей оборудования методом диакоптики. Этот метод позволяет привести исходную математическую или динамическую модель к модели малой размерности и оценить риски работоспособности виброактивного оборудования на высокотехнологичном предприятии. Анализ динамических свойств оборудования требует перехода от сложной технологической системы к упрощенной модели, которую можно разделить на относительно изолированные подсистемы с помощью метода диакоптики. Это позволяет учитывать критерии устойчивости, быстродействия и точности расчетных алгоритмов и идентифицировать возможные риски.

Использование метода диакоптики и применение уравнений Лагранжа второго рода привело к получению системы дифференциальных уравнений движения для виброактивной механической системы, которая включает в себя инерционные, жесткостные и демпфирующие элементы [19]. Этот подход позволяет более точно описать поведение системы и предсказать ее динамику. Такая система уравнений является основой для анализа и управления вибрациями в механических системах, что имеет большое практическое значение в различных областях, включая инженерию, автомобильную промышленность и аэрокосмическую технику.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + (c_2 + c_3)x + (c_3h_3 - c_2h_2)\varphi &= P\sin \alpha; \\ M\ddot{z} + (c_1 + c_4 + c_5)z + (c_4a_4 - c_5a_5)\varphi &= P\cos \alpha; \\ J_\eta\ddot{\varphi} + (c_2h_2^2 + c_3h_3^2 + c_4a_4^2 + c_5a_5^2)\varphi + \\ + (c_3h_3 - c_2h_2)x + (c_4a_4 - c_5a_5)z &= -Ph_p \sin \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

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

$J_{\eta} = \iiint_{(m)} (\xi^2 + \zeta^2) dm$ – массовый момент инерции тела по отношению к соответствующим осям инерции.

Дифференциальные уравнения (4) представляют собой инновационную математическую модель, которая описывает механические движения виброактивного оборудования в целом, а также фрезерного станка в частности. Эта уникальная модель является основой для проведения анализа системы на более низком уровне и прославилась своими упрощениями.

Используя эти дифференциальные уравнения, можно точно предсказать и описать движение виброактивного оборудования. Они позволяют учесть все важные факторы, такие как силы трения, массы и инерции, а также другие физические свойства системы.

Пользуясь решением дифференциальных уравнений в случае аналитического решения либо прибегая к численным методам решения для многомерных нелинейных систем, можно формировать подход, позволяющий решать задачу декомпозиции, прибегая к методу диакоптики.

Искомая координата линейного перемещения в механической системе, обозначенная как $x_1(t)$, может быть определена путем разрешения дифференциального уравнения (4) относительно выходной координаты. После проведения соответствующих математических операций для выражения выходной координаты получим следующее [17]:

$$x_1(t) = \frac{1}{mp^2} [cp(x - x_1) + k(x - x_1)]. \quad (5)$$

Параметр p здесь и в дальнейшем означает $p = d/dt$ – символ дифференцирования, если уравнение задано в области временного аргумента и $p = \alpha + \beta_i$ – в этом случае задания уравнения в области преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях.

Передаточная функция системы $W(p)$, представляющая отношение изображений выходной величины к входной, для рассматриваемой виброактивной системы равна

$$W(p) = \frac{x_i}{x(p)} = \frac{cp + k}{mp^2 + cp + k}. \quad (6)$$

Таким образом, изучение передаточной функции является ключевым аспектом в анализе динамических свойств виброактивной системы. Данное исследование обладает огромным значением, так как содержит всю необходимую информацию для изучения работы системы в различных режимах и при воздействии и влиянии внешних факторов. Понимание передаточной функции позволяет наиболее эффективно минимизировать риски, которые обусловлены использованием виброактивного оборудования. В целом исследование и анализ передаточной функции является неотъемлемой частью анализа. Оно позволяет предоставить всю важную информацию для эффективного управления системой и минимизации рисков, связанных с использованием виброактивного оборудования.

Синтез методов и инструментов минимизации рисков на высокотехнологичном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием

При решении задачи идентификации рисков виброактивного оборудования и управления ими прежде всего следует обратить внимание на анализ динамических моделей виброактивного оборудования, которое подвержено рискам технического износа. Для этой цели рекомендуется использовать метод диакоптики [17]. Очевидно, что развитие методов анализа движения механических составляющих системы, который связан с составлением и решением дифференциальных уравнений механических движений виброактивной механической системы, требует применения единого и системного подхода.

Таким образом, исследование применимости и эффективности методов управления рисками для высокотехнологичного предприятия, оснащённого виброактивным оборудованием, предполагает не только анализ динамических моделей, но и использование метода диакоптики. Однако для полноценного развития этого подхода требуется системный подход, который учитывает математическую модель виброактивной системы, полученную с применением метода диакоптики. Метод структурной интерпретации, или структурная теория виброзащитных систем [21], представляет собой эффективный способ исследования свойств и параметров механической колебательной системы. Структурная математическая модель виброактивной механической системы является структурной схемой, которая эквивалентна системе автоматического управления и динамически оценивает состояние системы объекта. В этой модели содержатся массоинерционные элементы, связанные с основанием жесткостными и демпфирующими связями. Чаще при рассмотрении динамических задач математические модели таких систем представляются в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Этот подход значительно упрощает моделирование и анализ систем с использованием преобразования Лапласа [18-20].

Математические модели конструкций позволяют определить физические значения упругих элементов в виброактивных системах. Эти элементы действуют как обратные отрицательные связи, компенсируя абсолютное отклонение защищаемого объекта от положения статического равновесия в замкнутой системе управления. Таким образом, использование обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в математических моделях и определение физических значений упругих элементов позволяют более полно и глубоко понять и исследовать динамику виброактивных систем. Это дает возможность разрабатывать эффективные методы управления и защиты от вибрации, обеспечивая безопасность и надежность работы таких систем.

Известно, что большинство металлорежущих станков высокотехнологичных предприятий, оснащённых виброактивным оборудованием, характеризуется

средне- и высокочастотными спектрами вибрации и шума. Уровни звукового давления на таких станках составляют от 85 до 100 дБ. Высокие уровни вибрации и шума отмечаются у крупногабаритных фрезерных, токарных, шлифовальных и револьверных станков.

Очевидно, что источники потенциальных рисков колебательных или виброактивных систем уходят в разнообразные сферы деятельности и применимости оборудования. Тем не менее в данном исследовании наше внимание фокусируется на вероятности технического износа оборудования на высокотехнологичных предприятиях, рассматриваемого как один из знаковых критериев эффективности работы технического оборудования. С целью снижения рисков, связанных с вибрационным оборудованием, необходимо разработать принципы синтеза методов и инструментов, которые помогут обеспечить непрерывную и безопасную работу станков. Для повышения эффективности и надежности систем защиты от вибраций является необходимым проводить исследования динамических процессов. Принято выделять два основных подхода, которые направлены на минимизацию рисков и на обеспечение высокого качества работы оборудования. Первый подход основан на использовании активных виброзащитных систем (АВЗС), которые, в свою очередь, обладают специальными устройствами, изменяющими динамические характеристики системы под воздействием внешней энергии. Это отличает их от пассивных виброзащитных систем, которые представляют собой упругие механические системы с закрытой структурой [5].

Второй подход заключается в применении дина-

мических гасителей колебаний. Данные гасители позволяют снизить возможное воздействие вибрации на оборудование, обеспечивая высокое качество.

Таким образом, проведение исследований динамических процессов в системах защиты от вибрационных воздействий является необходимым для достижения минимизации рисков и обеспечения высокого качества работы вибрационно-активного оборудования. Активные виброзащитные системы и динамические гасители колебаний представляют собой два основных подхода, которые позволяют достичь этих целей.

Данный подход активно применяется в машиностроении и высокотехнологичном производстве, где управление качеством играет важную роль. Он позволяет эффективно управлять вибрацией и колебаниями, обеспечивая стабильную работу оборудования и направлен на минимизацию рисков. Поэтому изучение динамических процессов, использование активных систем виброзащиты и применение принципов управления, ориентированных на процесс, являются основными вопросами в области обеспечения качественной работы вибрирующего активного оборудования и снижения рисков.

Исследование передаточной функции $W(p)$, определенной выражением (6), чрезвычайно важно для анализа динамических свойств виброактивной системы, так как содержит в себе всю информацию, необходимую для изучения систем при различных режимах и внешних воздействиях, обуславливающих возможность появления рисков событий.

Структурная схема системы, содержащей активные и пассивные связи, изображена на **рис. 1**.

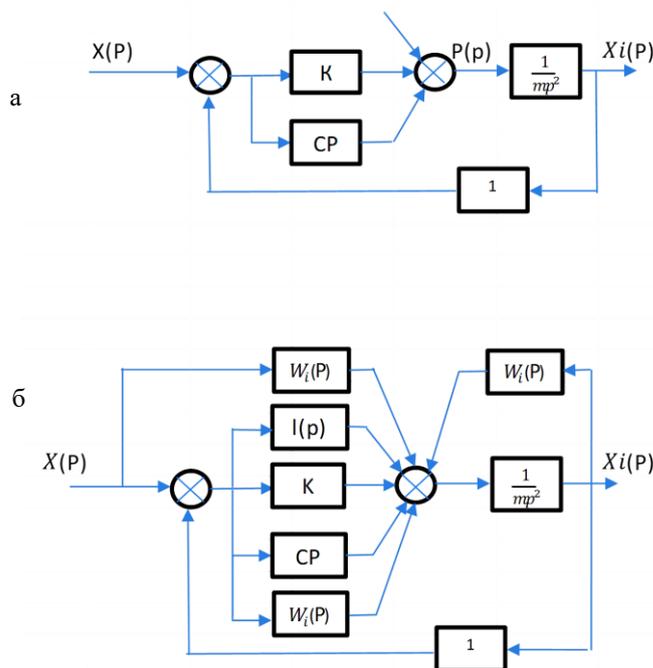


Рис. 1. Структурная схема виброзащитной системы: а – пассивной; б – активной
 Fig. 1. A structural diagram of the vibration isolation system: a is passive; б is active

На схеме $l(p)$ и $W_i(p)$ – операторы пассивной и активной связей. Рассматривая в частных случаях присутствие в качестве дополнительных связей операторов $l(p)$, $W_1(p)$, $W_2(p)$ или $W_3(p)$, подвергнем анализу соответственно пассивную и управляемую активную систему с управлением по абсолютному отклонению, возмущению или относительному смещению.

Вышеописанная краткая систематизация применимости методов уменьшения рисков в высокотехнологичном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием, неоспоримо предполагает тщательный анализ потенциальных и эффективных стратегий управления и уменьшения рисков, связанных с техническим износом оборудования. Реализация подобных стратегий в первую очередь подразумевает способность разработки управляющих законов для виброактивной системы, основанных на детальном анализе передаточной функции, получаемой в ходе структурной интерпретации виброактивной системы.

Обращение к принципам процессно-ориентированного управления предоставляет возможность рассмотреть предлагаемую структуру как замкнутую систему с отрицательной обратной связью в соответствии с теорией автоматического управления. Этот подход позволяет исследовать систему с единых позиций, где используются различные формы энергии для определения характеристик элементов, входящих в обратную связь системы. Из этого следует, что реализация исполнительных механизмов возможна при помощи струйных, электродинамических механических принципов, а также с помощью выбора принципа работы и регулируемой жесткости исполнительных механизмов. В составе виброактивной системы, помимо исполнительных механизмов, присутствуют датчики обратной связи, усилители и распределительные устройства. Эти компоненты играют важную роль в управлении системой и позволяют ей функционировать эффективно. Сигнал обратной связи, полученный от датчиков, проходит через трансформацию, которая зависит от различных параметров, таких как резкость, ускорение, смещение, дифференциальное давление или усилие. Это позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям и реагировать на них соответствующим образом.

В итоге виброактивная система с включенными датчиками обратной связи, усилителями и распределительными устройствами является сложной и многофункциональной системой, способной эффективно реагировать на изменяющиеся условия и выполнять задачи с высокой точностью и надежностью [14, 18].

Исследование виброактивной системы в качестве замкнутой системы автоматического управления позволяет выявить влияние обратной связи на характеристики данной системы. Это помогает понять, как дополнительные звенья и связи формируют активное воздействие на объект защиты виброактивной системы и снижают риски технического износа оборудования. Управление движением исполнительного механизма

осуществляется через устройство управления и корректируется при прохождении сигнала через различные динамические элементы обратной связи. Передаточная функция $W_p(p)$ устройства управления в низкочастотной области может быть представлена звеном первого порядка общего вида [18-20].

Далее приведены результаты выполненного исследования, где производилась идентификация инструментов управления и минимизация рисков технического износа оборудования на основе анализа передаточной функции $W(p)$. При использовании различных законов управления обратной связью

$$W_p(p) = \frac{d_0 + d_1 P}{e_0 + e_1 P}. \quad (7)$$

Закон управления виброактивной системой и, соответственно, передаточная функция $W(p)$ имеет различный характер в зависимости от конкретных значений параметров d_i и e_i .

1. Пропорциональное управление АПВЗС в случае управления по абсолютному отклонению определяется обратной связью системы, имеющей передаточную функцию вида $W_p(p) = \frac{d_0}{e_0}$.

2. Интегральный закон регулирования виброактивной системой реализуется при пропорциональной зависимости между скоростью перемещения распределительного устройства и перемещением объекта защиты: $\dot{X}_p = K_u \cdot X_1$, или в операторной форме

$$W_p(p) = \frac{K_u}{P} = \frac{d_0}{e_1 P}.$$

Интегрирование позволяет определить данный закон управления как перемещение распределительного устройства (РУ) системы управления, пропорциональное интегралу от перемещения объекта защиты: $X_p = K_u \int X_1 dt$.

3. Управление системой в соответствии с идеальным дифференцирующим законом характеризуется передаточной функцией вида $W_p(p) = K_g P = \frac{d_1 P}{e_0}$.

Практически такое управление реализовано быть не может вследствие неустойчивости характеристик чисто дифференцирующего типа. Реальное дифференцирующее управление осуществляется при пропорциональной зависимости скорости объекта защиты от действующих параллельно перемещения и скорости РУ: $Tg\dot{X}_p + X_p = Kg\dot{X}_1$, или в операторной

$$\text{форме } W_p(p) = \frac{KgP}{TgP + 1} = \frac{d_1 P}{e_0 + e_1 P}.$$

4. Аперриодичное управление, в отличие от рассмотренного выше случая, характеризуется пропорциональной зависимостью между перемещением объекта защиты и действующих в параллельной цепи перемещением и скоростью распределительного

устройства: $T_a \dot{X}_p + X_p = KX_1$, или в операторной форме [18-21] $W_p(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1} = \frac{d_0}{e_0 + e_1 p}$.

Для определения применимости конкретного закона управления в виброактивной системе необходимо провести детальный и качественный анализ результатов работы системы при воздействии вибраций и ударов. Именно эти данные будут использоваться для принятия решений по управлению или минимизации рисков на высокотехнологичном предприятии, где присутствует виброактивное оборудование.

Анализ полученных результатов работы системы при вибрационных воздействиях позволяет оценить эффективность применения конкретного закона управления. Эти данные помогут определить, насколько успешно система справляется с воздействиями и какие необходимо предложить и предпринять меры для улучшения ее работы. На основе полученных данных можно разработать стратегию управления или минимизации рисков на предприятии.

Таким образом, оценка применимости конкретного закона управления в виброактивной системе основывается на детальном анализе результатов работы системы при воздействии вибрационных воздействий. Полученные данные в процессе анализа являются основой для принятия решений по управлению или минимизации рисков на предприятии, оснащенном высокотехнологичным оборудованием.

Устойчивость виброактивных систем

Критерии устойчивости, разработанные для систем с передаточной функцией $W(p)$, могут быть рассмотрены с помощью метода Д-разбиения, который позволяет определить границы допустимого изменения параметров и области устойчивости системы. Это позволяет обеспечить устойчивость виброактивной системы при наличии параметрических неопределенностей.

Необходимым и достаточным условием устойчивости виброактивной системы является отрицательность действительных частей всех корней λ_i , характеристического уравнения, полученного из знаменателя передаточной функции вида (7):

$$M_0 \lambda^4 + M_1 \lambda^3 + M_2 \lambda^2 + M_3 \lambda + M_4 = 0. \quad (8)$$

Представленный метод Д-разбиения является эффективным инструментом для исследования устойчивости виброактивной системы предприятия, использующего высокотехнологичное оборудование. Однако этот метод также способен оценить влияние изменяемых параметров на устойчивость имеющейся системы. Анализ кривых Д-разбиения позволяет выявить, как изменение постоянной времени влияет на величину зоны устойчивости. Это зависит от алгоритма управления $W_p(p)$, который используется в данной системе. Таким образом, метод Д-разбиения не только помогает определить устойчивость и удаленность от границ устойчивости виброактивной системы, но и позволяет

оценить влияние изменяемых параметров на ее устойчивость. Анализ кривых Д-разбиения помогает выявить зависимости между постоянной времени и величиной зоны устойчивости в зависимости от используемого алгоритма управления $W_p(p)$.

Заключение

Проблема управления высокотехнологичными предприятиями становится все более насущной не только в контексте деятельности самих компаний, но и приобретает все большую значимость в обеспечении конкурентоспособности национальной экономики. В статье представлены результаты применения методов и инструментов управления рисками на предприятии высокотехнологичного машиностроения, оснащенного виброактивными устройствами. Одной из ключевых задач разработки технологического процесса, вовлекающего в себя виброактивное оборудование, является обеспечение требуемого уровня качества производимой продукции.

Согласно проведенным исследованиям, использование инновационной методики, основанной на диакоптическом подходе, предоставляет уникальные возможности для эффективного проектирования параметров технологического процесса с применением виброактивного оборудования. Этот прогрессивный метод позволяет достичь не только необходимого уровня качества продукции, но и значительно снизить риск ошибок и поломок, связанных с использованием такого оборудования в процессе производства. Установлена неотъемлемая необходимость в контроле изменений вибрационного состояния технологического оборудования с целью снижения потенциальных рисков для машиностроительных предприятий и обеспечения безопасности производственных процессов. Регулярная диагностика технического состояния на основе данных о вибрации становится неотъемлемой частью внедрения этой методики, позволяя своевременно выявлять и анализировать возможные проблемы.

Ограничиваясь анализом вероятности технического износа оборудования на машиностроительном предприятии, как одного из критически важных факторов для обеспечения эффективной работы, в статье выдвигаются инновационные принципы реализации синтеза методов и инструментов для снижения рисков, связанных с вибрационно-активным оборудованием. Это обусловливает неотложность исследований динамических процессов, происходящих на высокотехнологичном оборудовании машиностроительного предприятия. Формулируются методы эффективного управления рисками на современном предприятии, оснащенном вибрационно-активными системами. В числе таких методов применение диакоптики и структурной интерпретации, включая структурную теорию виброзащитных систем. В качестве эффективных стратегий для снижения технического износа оборудования предлагается провести анализ передаточной функции, полученной при структурной интерпретации виброактивной

системы. Подчеркнуто, что решение поставленной задачи о минимизации рисков и обеспечении динамического качества виброактивного оборудования может быть успешно достигнуто с использованием управляемых или активных виброзащитных систем (АВЗС). При обращении к методам, описанным в структурной теории виброзащитных систем, и проведении анализа передаточной функции предложено рассмотрение законов управления виброактивной системой на основе пропорциональных, интегральных, дифференциальных или аperiodических алгоритмов управления.

Оценка применимости конкретного закона управления виброактивной системой становится возможной на основе результатов функционирования системы в соответствии с рассмотренными нормативами в условиях воздействия вибрационных и ударных воздействий. Это, в свою очередь, способствует эффективно-му решению задач управления или минимизации рисков на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием. Критерии устойчивости, специально разработанные для виброактивных систем, подвергаются анализу при использовании метода Д-разбиения, что придает всей системе дополнительный уровень надежности и оптимизации.

Список источников

1. Приказ Росстата от 15.12.2017 № 832 «Об утверждении Методики расчета показателей «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте». Росстат (15 декабря 2017). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_285510/
2. Национальный доклад «Высокотехнологичный бизнес в регионах России» / под ред. С.П. Земцова. М.: РАНХиГС, АИРР, 2020. 119 с.
3. Гаврилова С.В. Концептуальные основы определения высокотехнологичного сектора экономики и функционирования высокотехнологичных компаний // Статистика и экономика. 2014. №2. С. 53-57.
4. Международный стандарт ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» (ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements, IDT»).
5. Международный стандарт ИСО 31000:2018 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» (ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines, IDT»).
6. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. <https://euro-register.ru>
7. Фролов В.Г., Сидоренко Ю.А., Мартынова Т.С. Формирование модели оценки и предупреждения рисков в условиях цифровизации промышленных предприятий // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. №6. С. 1547-1562.
8. Васин С.М., Шутов В.С. Управление рисками на предприятии: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2010.
9. Асаул В.В., Кощеев В.А., Цветков Ю.А. Оценка конкурентоспособности организаций в условиях цифровой экономики // Вопросы инновационной экономики. 2020. №1. С. 533-547.
10. Габалова Е.Б., Тегетаева О.Р. Конкурентоспособность предприятий в условиях цифровой экономики // Modern Science. 2021. №6-2. С. 42-44.
11. Никулин Р.А. Трансформация факторов конкурентоспособности в условиях цифровой экономики // Вестник РУК. 2019. №1(35). С. 56-64.
12. Ратникова Е.А., Щеулина Т.В. Влияние рисков цифровизации на конкурентоспособность высокотехнологичных предприятий авиастроительной отрасли // Вестник Академии знаний. 2022. №48(1). С. 267-277. DOI: 10.24412/2304-6139-2022-48-1-267-277
13. Паспорт научной специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» / Приказ Минобр. науки РФ «Об утверждении номенклатуры научных специальностей...» от 24.02.2021. №118.
14. Implementation of ESG Sustainable Development Concept Criteria Using the Robust Design Methods / Lontsikh P.A., Golovina E.Y., Evloeva M.V., Livshitz I.I., Koksharov A.V. // Proceedings of the 2022 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies". S. Petersburg, 2022, pp. 173-176.
15. Азаров В.Н., Леохин Ю.Л. Интегрированные информационные СМК. М.: Европейский центр по качеству, 2002. 64 с.
16. Семенова Е.Е. Актуальные проблемы риска в России // Инновационная наука. 2015. №6. С. 54-56.
17. Управление рисками на основе методов диакоптики при синтезе виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия / Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Федотова А.В. // Системы. Методы. Технологии. 2023. №3(59). С. 38-45. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-38-45
18. Лонцих П.А. Обеспечение динамического качества станков на основе методов диакоптики и результатов диагностики: автореф. дис. ... д-ра наук. Иркутск, 2004.
19. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосибирск: Наука, 1978. 218 с.
20. Лонцих П.А., Елисеев С.В. Динамическое качество машин и оборудования как инструмент обеспечения надежности производства и конкурентоспособности процессов. Иркутск, 2014. 322 с.
21. Связь цикла Деминга и спирали качества Джурана в задачах развития цикла PDCA и создания сетцентрической системы менеджмента / Лонцих П.А., Кунаков Е.П., Лонцих Н.П., Федотова А.В. // Качество. Инновации. Образование. 2023. №1(183). С. 3-10. DOI: 10.31145/1999-513x-2023-1-03-10

References

1. Order of Rosstat No. 832 dated December 15, 2017 "On approval of the Methodology for calculating the

- indicators of “The share of products of high-tech and knowledge-intensive industries in the gross domestic product”. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_285510/
2. National report: «High-tech business in Russian regions». 2020. National report. Moscow: Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Association of Innovative Regions of Russia, 2020, 119 p. ISBN 978-5-85006-214-9. (In Russ.)
 3. Gavrilova S.V. A conceptual framework for determining a high-tech sector of the economy and functioning high-tech companies. *Statistika i ekonomika* [Statistics and Economics]. 2014;(2):53-57. (In Russ.)
 4. International standard ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Available at: <https://www.iso.org/obp>
 5. International standard ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines. Available at: <https://pqm-online.com › iso-31000-2018-PDF>
 6. State standard GOST RV 0015-002-2020. The system for the development and production of military equipment. Quality management systems. General requirements. Available at: <https://euro-register.ru>.
 7. Frolov V.G., Sidorenko Yu.A., Martynova T.S. Creating a model for assessing and preventing risks in the context of digitalization of industrial enterprises. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo* [Economics, Entrepreneurship and Law]. 2021;11(6):1547-1562. (In Russ.)
 8. Vasin S.M., Shutov V.S. *Upravlenie riskami na predpriyatii: ucheb. posobie* [Risk management at an enterprise: study guide]. Moscow: KNORUS, 2010. (In Russ.)
 9. Asaul V.V., Koshcheev V.A., Tsvetkov Yu.A. Assessing competitiveness of organizations in the digital economy. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics]. 2020;(1):533-547. (In Russ.)
 10. Gabalova E.B., Tegetaeva O.R. Competitiveness of enterprises in the digital economy. *Modern Science*. 2021;(6-2):42-44. (In Russ.)
 11. Nikulin R.A. Transformation of competitiveness factors in the digital economy. *Vestnik RUK* [Vestnik of the Russian University of Cooperation]. 2019; (1(35)):56-64. (In Russ.)
 12. Ratnikova E.A., Shcheulina T.V. The impact of digitalization risks on competitiveness of high-tech enterprises in the aircraft industry. *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge]. 2022;(48(1)):267-277. (In Russ.) DOI: 10.24412/2304-6139-2022-48-1-267-277
 13. Certificate of research major 2.5.22. “Product quality management. Standardization. Organization of production”. Order of the Ministry of Education and Science No. 118 dated February 24, 2021 “On approval of the nomenclature of research majors”.
 14. Lontsikh P.A., Golovina E.Y., Evloeva M.V., Livshitz I.I., Koksharov A.V. Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods. Proceedings of the 2022 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies”. Saint Petersburg, 2022, pp. 173-176. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976803
 15. Azarov V.N., Leokhin Yu.L. *Integrirovannye informatsionnye SMK* [Integrated information QMS]. Moscow: European Center for Quality, 2002, 64 p. (In Russ.)
 16. Semenova E.E. Current problems of risk in Russia. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science]. 2015;(6):54-56. (In Russ.)
 17. Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Fedotova A.V. Risk management based on the diakoptics methods in the synthesis of vibration active equipment at a high-tech enterprise. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2023;(3(59)):38-45. (In Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-38-45
 18. Lontsikh P.A. *Obespechenie dinamicheskogo kachestva stankov na osnove metodov diakoptiki i rezultatov diagnostiki: avtoref. dis. ... d-ra nauk* [Ensuring the dynamic quality of machines using the diakoptics methods and diagnostic results. Extended abstract of the doctoral thesis]. Irkutsk, 2004.
 19. Eliseev S.V. *Strukturnaya teoriya vibrozashchitnykh sistem* [Structural theory of vibration isolation systems]. Novosibirsk: Nauka, 1978, 218 p. (In Russ.)
 20. Lontsikh P.A., Eliseev S.V. *Dinamicheskoe kachestvo mashin i oborudovaniya kak instrument obespecheniya nadezhnosti proizvodstva i konkurentosposobnosti protsessov* [Dynamic quality of machines and equipment as a tool for ensuring production reliability and competitiveness of processes]. Irkutsk, 2014, 322 p. (In Russ.)
 21. Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Lontsikh N.P., Fedotova A.V. The connection between the Deming cycle and the Juran quality spiral in the tasks of developing the PDCA cycle and creating a network-centric management system. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(1(183)):3-10. (In Russ.) DOI: 10.31145/1999-513x-2023-1-03-10

Поступила 25.01.2024; принята к публикации 15.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 25/01/2024; revised 15/04/2024; published 27/06/2024

Лонцих Павел Абрамович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: palon@list.ru. ORCID 0000-0001-7688-31904

Головина Елена Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: elena_uspeh@mail.ru. ORCID 0000-0002-5215-9289

Лонцих Наталья Павловна – кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: natalysib@list.ru. ORCID 0000-0002-0453-9156

Лившиц Илья Иосифович – доктор технических наук, профессор практики, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. Email: livshitz.il@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0651-8591. Scopus ID 57191569306.

Pavel A. Lontsikh – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: palon@list.ru. ORCID 0000-0001-7688-31904

Elena Yu. Golovina – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Digital Business Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: elena_uspeh@mail.ru. ORCID 0000-0002-5215-9289

Natalia P. Lontsikh – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: natalysib@list.ru. ORCID 0000-0002-0453-9156

Ilya I. Livshits – DrSc (Eng.), Adjunct Professor, National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia. Email: livshitz.il@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0651-8591. Scopus ID 57191569306.