

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт автоматики и информационных технологий
Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

Тлепбергенов Жумагали Уразгалиулы

«Анализ надежности виброзащитных устройств на виброопорах качения»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7M07107 – Робототехника и мехатроника

Алматы 2026

Некоммерческое Акционерное Общество «Казахский Национальный
Исследовательский Технический Университет имени К.И.Сатпаева»



**SATBAYEV
UNIVERSITY**

Институт автоматизации и информационных технологий

УДК:

На правах рукописи

На соискание академической степени магистра

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Название диссертации: Анализ надежности виброзащитных устройств на
виброопорах качения

Направление подготовки: 7М07107 – Робототехника и мехатроника

Научный руководитель:

к.т.н., ассоциированный профессор

Тулешов Е.А.

«12» 01 2026 г.

Рецензент:

К.т.н., ассоциированный профессор

Сейдилдаева А.К.

«12» 01 2026 г.

Нормоконтроль:

PhD, ассоциированный профессор

Рахметова П.М.

«12» 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой РТиТСА

Кандидат технических наук,

профессор

К.А. Ожикенов

«12» 01 2026 г.

Ф КазННТУ 704-22. Рецензия

Алматы 2026

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»



Институт автоматики и информационных технологий

Кафедра «Робототехники и технических средств автоматики»

7М07107 – Робототехника и мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

РТиТСА

Кандидат технических

наук,

профессор

К.А. Ожикенов

подпись Ф.И.О

«12» 01/2024 г.



ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Тлепбергенов Жумагали Уразгалиулы

Тема: «Анализ надежности виброзащитных устройств на виброопорах качения»

Утверждено приказом № 108 от «12» 01/2024 г.

Срок сдачи законченной диссертации: «12» 01/2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: научные и учебные публикации по нелинейной динамике твердого тела, сейсмоизоляции сооружений и применению методов машинного обучения в механике; существующие методы статистической линеаризации и численного моделирования стохастических систем; массив экспериментальных (модельных) данных временных реализаций фазовых координат виброзащитной системы; геометрические параметры опор качения со спрямленными поверхностями и масс-инерционные характеристики защищаемого объекта; программные средства для численного интегрирования и интеллектуального анализа данных (Python, библиотеки Scikit-learn, Pandas, NumPy).

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) проанализировать существующие методы расчета систем виброзащиты и сейсмоизоляции, а также подходы к применению искусственного интеллекта в задачах динамики;
- б) исследовать особенности формирования нелинейных восстанавливающих сил в опорах качения со спрямленными поверхностями;
- в) разработать математическую модель пространственного движения твердого тела на виброопорах при стохастическом кинематическом воздействии;
- г) разработать алгоритм численного моделирования методом Монте-Карло и методику прогнозирования отклика системы с использованием алгоритмов машинного обучения (Random Forest);
- д) реализовать разработанные алгоритмы численного анализа и построения суррогатной модели в программной среде;
- е) провести вычислительные эксперименты по получению вероятностных характеристик фазовых координат и оценке точности прогнозирования ML-модели;
- ж) выполнить анализ полученных результатов, оценить влияние геометрических параметров опор на надежность системы и сравнить эффективность численного и нейросетевого подходов.

Рекомендуемая основная литература:


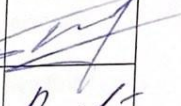
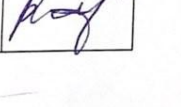
- Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий. М.: Наука, 1995. 164 с.
- Nayfeh A.H., Mook D.T. Nonlinear Oscillations. New York: John Wiley & Sons, 1979. 720 p.
- Бисембаев К., Исаков Ж., Сагадинова А. Исследование случайных колебаний твердого тела на виброопорах со спрямленными поверхностями // Mechanisms and Machine Science. 2022. Vol. 113. P. 805–813.
- Bissembayev K., Isakov Z. Vibrations of a Rigid Body on Rolling Vibration Bearings in Case of Accidental Kinematic Perturbations // Mechanisms and Machine Science. 2022. Vol. 122. P. 265–272.
- Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32.
- Worden K., Manson G. The application of machine learning to structural health monitoring // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2007. Vol. 365. P. 515–537.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представление научному руководителю	Примечание
Анализ уравнений движения и генерация базы данных методом Монте-Карло.	01.09 - 18.10.2025	Выполнено
Обучение модели Random Forest, прогнозирование отклика и оценка важности признаков.	21.09 - 15.11.2025	Выполнено
Сравнение численного и ML-подходов, оценка погрешности и написание диссертации.	16.11 - 22.12.2025	Выполнено

Подписи

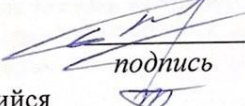
консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основной раздел	Тулешов Е.А. Доктор PhD, Кандидат технических наук старший преподаватель	10.01.26	
Расчет раздел	Тулешов Е.А. Доктор PhD, Кандидат технических наук Старший преподаватель	10.01.26	
Норм контролер	Рахметова П. М. Доктор PhD, Ассоциированный профессор	12.01.26	

Научный руководитель

Задания принял к исполнению обучающийся

Дата


 подпись
Тулешов Е.А.
 Ф.И.О.
Глепбергенов Ж.У.
 Ж.У.
 Ф.И.О.
 «__» __ 20__ г.

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается задача анализа надёжности виброзащитных устройств на виброопорах качения, применяемых для защиты сооружений и оборудования от вибрационных и сейсмических воздействий. Основное внимание уделено исследованию динамического отклика систем с кинематическими виброопорами, обладающими нелинейными восстанавливающими свойствами.

Проведён анализ современного состояния проблемы виброзащиты и сейсмоизоляции, рассмотрены особенности виброопор качения со спрямлёнными поверхностями и релаксирующим основанием. Разработана базовая математическая модель динамики виброзащитной системы с учётом стохастического характера внешних воздействий.

Выполнено численное моделирование стохастических колебаний системы методом Монте-Карло. На основе результатов моделирования сформирован массив данных, включающий временные реализации перемещений, скоростей и ускорений, а также параметров, характеризующих предельные состояния системы. Проведена статистическая обработка полученных данных и анализ вероятностных характеристик динамического отклика.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки надёжности виброзащитных устройств и дальнейшего применения методов машинного обучения при анализе сложных нелинейных динамических систем.

Ключевые слова: виброзащита, сейсмоизоляция, опоры качения, стохастические колебания, надёжность, численное моделирование

АҢДАТПА

Бұл жұмыста дірілдік және сейсмикалық әсерлерден ғимараттар мен жабдықтарды қорғауға арналған домалау тіректері бар виброқорғау құрылғыларының сенімділігін талдау мәселесі қарастырылады. Негізгі назар кинематикалық виброопоралары бар жүйелердің динамикалық жауаптарын зерттеуге және олардың бейсызық қалпына келтіруші қасиеттерін талдауға аударылған.

Жұмыста виброқорғау және сейсмооқшаулау саласындағы заманауи зерттеулерге шолу жасалып, спрямлёнған беттері және релаксацияланатын негізі бар домалау тіректерінің ерекшеліктері қарастырылған. Сыртқы әсерлердің стохастикалық сипатын ескеретін виброқорғау жүйесінің математикалық моделі ұсынылған.

Монте-Карло әдісі негізінде жүйенің стохастикалық тербелістеріне сандық модельдеу жүргізілді. Модельдеу нәтижелері бойынша орын ауыстыру, жылдамдық және үдеу уақыттық жүзеге асуларының массиві қалыптастырылды, сондай-ақ жүйенің шектік күйлерін сипаттайтын параметрлер анықталды. Алынған деректерге статистикалық талдау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері виброқорғау құрылғыларының сенімділігін бағалау және бейсызық динамикалық жүйелерді талдауда машиналық оқыту әдістерін қолдану үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: виброқорғау, сейсмооқшаулау, домалау тіректері, стохастикалық тербелістер, сенімділік, сандық модельдеу.

ABSTRACT

This thesis addresses the problem of reliability analysis of vibration protection devices based on rolling supports used for vibration and seismic isolation of structures and equipment. Special attention is paid to the dynamic response of systems with kinematic vibration isolators exhibiting nonlinear restoring properties.

The current state of vibration protection and seismic isolation technologies is reviewed, and the features of rolling supports with flattened surfaces and relaxing foundations are analyzed. A basic mathematical model of the vibration protection system is developed, taking into account the stochastic nature of external excitations.

Numerical simulation of stochastic oscillations is performed using the Monte Carlo method. Based on the simulation results, a dataset containing time histories of displacement, velocity, acceleration, and parameters characterizing limit states is formed. Statistical analysis of the obtained data is carried out to evaluate probabilistic characteristics of the system response.

The results of the study can be used for reliability assessment of vibration protection devices and for further application of machine learning methods in the analysis of complex nonlinear dynamic systems.

Keywords: vibration protection, seismic isolation, rolling supports, stochastic oscillations, reliability, numerical simulation.

Содержания

1.ВВЕДЕНИЕ	11
1.1 Актуальность темы.....	11
2 Анализ состояния проблемы и базовая математическая модель виброзащитных устройств.....	15
2.1. Виброзащита и сейсмозащита сооружений: современное состояние и тенденции	15
2.2. Виброзащитные устройства на опорах качения со спрямлёнными поверхностями	17
2.3. Геометрия и кинематика виброопор качения с поверхностями высокого порядка.....	20
2.4. Влияние релаксирующего основания и трения качения на динамику системы	23
2.5. Уравнения движения виброзащитной системы при случайных воздействиях	25
1.6. Стохастическая постановка задачи и показатели надёжности виброзащитных устройств.....	28
2.7. Выводы по главе 1.....	31
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ	33
3.1. Постановка задачи численного моделирования.....	33
Переменные состояния и их математическое определение	33
Структура используемого датасета	33
3.2. Исходные параметры виброзащитной системы и расчётные варианты	34
3.3. Стохастическая модель кинематического воздействия и формирование реализаций	36
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	38
4.1. Методика численного эксперимента и формирование обучающей выборки	38
4.1.1. Алгоритм моделирования методом Монте-Карло	38

4.2. Оценка показателей надежности виброзащитной системы вероятностными методами	40
4.3. Разработка суррогатной модели виброзащитной системы на основе методов машинного обучения	42
4.4. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов и верификация модели	45
4.5. Выводы по разделу 4.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	50
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	52
Приложение А	54
Приложение Б	61
Приложение В	Ошибка! Закладка не определена.

1.ВВЕДЕНИЕ

1.1 Актуальность темы

Значительная часть территории Республики Казахстан относится к сейсмоопасным регионам, в которых интенсивно ведётся строительство гражданских, промышленных и инфраструктурных объектов. Воздействие землетрясений и техногенных вибраций представляет серьёзную угрозу надёжности и безопасности зданий, сооружений и оборудования. В связи с этим задачи повышения сейсмостойкости и виброзащиты конструкций сохраняют высокую научную и практическую актуальность.

Одним из перспективных направлений снижения динамических нагрузок является применение виброзащитных устройств на опорах качения со спрямлёнными поверхностями. Такие системы позволяют реализовать кинематический принцип виброизоляции, при котором часть энергии внешнего воздействия расходуется на относительное перемещение защищаемого объекта относительно основания. Существенное влияние на динамику данных систем оказывает взаимодействие опор качения с релаксирующим основанием, приводящее к возникновению сил трения качения, зависящих от истории нагружения и реологических свойств грунта.

Анализ динамики и надёжности виброзащитных устройств на опорах качения, как правило, основывается на решении нелинейных стохастических уравнений движения и требует значительных вычислительных затрат, особенно при учёте случайных воздействий и многократных реализаций. Это существенно усложняет параметрический анализ и оптимизацию конструктивных решений.

Современное развитие вычислительных методов и технологий анализа данных позволяет дополнить классические подходы методами машинного обучения, которые способны аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между параметрами системы и показателями её динамического отклика. Применение таких методов открывает новые возможности для ускоренной оценки надёжности виброзащитных устройств и повышения эффективности инженерных расчётов, что определяет актуальность настоящего исследования.

Степень разработанности проблемы

В отечественной и зарубежной литературе накоплен значительный объём исследований, посвящённых виброзащите и сейсмозащите сооружений. Широко изучены упругие и кинематические системы сейсмоизоляции, виброзащитные устройства на упругих опорах, а также конструкции с различными типами демпфирования.

Существенный вклад в развитие теории виброзащитных устройств на опорах качения со спрямлёнными поверхностями внесли исследования, в которых рассмотрены их кинематика, геометрические особенности, уравнения движения и влияние трения качения на релаксирующем основании. Разработаны математические модели нелинейных и стохастических

колебаний таких систем, применялись методы статической линеаризации, марковских процессов и метод Монте-Карло для получения вероятностных характеристик динамического отклика.

В то же время применение методов машинного обучения к задачам анализа надёжности виброзащитных устройств на опорах качения остаётся недостаточно исследованным. В большинстве работ методы машинного обучения используются либо для анализа отдельных строительных конструкций, либо для управления активными системами виброзащиты, без тесной интеграции с физически обоснованными моделями кинематических виброопор.

Таким образом, существует научная ниша, связанная с разработкой комплексного подхода, объединяющего классическое численное моделирование виброзащитных систем и методы машинного обучения для анализа их надёжности.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются виброзащитные устройства на виброопорах качения со спрямлёнными поверхностями, взаимодействующие с релаксирующим основанием при случайных динамических воздействиях.

Предметом исследования являются динамические и надёжностные характеристики указанных виброзащитных устройств, а также методы машинного обучения, применяемые для аппроксимации и анализа зависимости показателей надёжности от параметров системы.

Цель и задачи работы

Целью работы является анализ надёжности виброзащитных устройств на виброопорах качения со спрямлёнными поверхностями на основе сочетания численного моделирования и методов машинного обучения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**: проанализировать существующие подходы к моделированию виброзащитных устройств на опорах качения;

сформировать математическую модель динамики виброзащитной системы с учётом трения качения на релаксирующем основании;

выполнить численное моделирование стохастических колебаний системы при различных параметрах;

сформировать набор данных, характеризующих динамический отклик и показатели надёжности системы;

поставить и решить задачи машинного обучения в форме регрессии для прогнозирования надёжностных характеристик;

провести анализ влияния параметров виброопор на надёжность системы;

сформулировать инженерные рекомендации по повышению надёжности виброзащитных устройств.

Методы исследования

В работе используются следующие **методы исследования**:

- методы теоретической и прикладной механики;
- методы теории случайных процессов и стохастических колебаний;
- численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений;
- метод статистического моделирования (метод Монте-Карло);
- методы машинного обучения, включая регрессионные модели, ансамблевые методы и нейронные сети;
- методы статистического анализа и оценки точности моделей.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен подход к анализу надёжности виброзащитных устройств на опорах качения, основанный на сочетании физически обоснованного моделирования и методов машинного обучения;
- разработана схема формирования обучающей выборки на основе численного моделирования стохастических колебаний;
- выполнено сравнительное исследование различных моделей машинного обучения применительно к прогнозированию надёжностных характеристик виброзащитных устройств;
- выявлены ключевые параметры виброопор качения, оказывающие наибольшее влияние на надёжность системы.

Практическая значимость

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы:

- при инженерном проектировании и оптимизации виброзащитных и сейсмозащитных систем;
- для ускоренной оценки надёжности виброопор качения без проведения трудоёмких численных расчётов;
- при разработке цифровых моделей и программных средств анализа динамики виброзащитных устройств;
- в учебном процессе при подготовке специалистов в области механики, строительства и виброзащиты.

Структура работы

Магистерская диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. В первой главе рассмотрены теоретические основы виброзащиты и базовая математическая модель виброзащитных устройств на опорах качения. Во второй главе описаны численное моделирование и формирование базы данных для анализа надёжности. Третья глава посвящена применению методов машинного обучения для

анализа надёжности виброзащитных устройств.
В четвёртой главе приведён инженерный анализ результатов и даны
рекомендации по повышению надёжности системы.
В заключении сформулированы основные выводы и перспективы дальнейших
исследований.

2 Анализ состояния проблемы и базовая математическая модель виброзащитных устройств

2.1. Виброзащита и сейсмозащита сооружений: современное состояние и тенденции

Вибрационные и сейсмические воздействия являются одними из наиболее значимых факторов, определяющих надёжность и безопасность зданий, сооружений и инженерных систем. В условиях сейсмоактивных регионов динамические нагрузки, возникающие при землетрясениях, формируют кратковременные, но высокоинтенсивные инерционные силы, которые зачастую превышают расчётные значения, принятые при проектировании конструкций. Анализ последствий сильных землетрясений показывает, что основными причинами повреждений и разрушений являются высокие ускорения и значительные относительные перемещения элементов сооружений, а не только превышение прочностных характеристик материалов [1],[13].

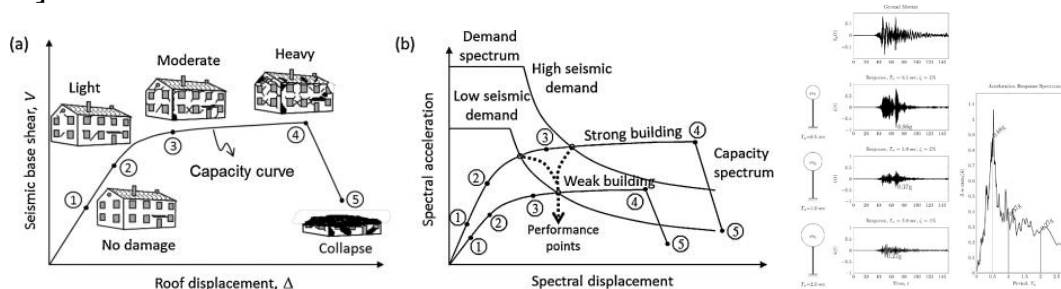


Рисунок 1.1 – Повреждение сооружений вследствие высоких инерционных ускорений при землетрясениях

Традиционные методы повышения сейсмостойкости сооружений основаны на увеличении жёсткости, прочности и энергоёмкости несущих элементов. Такой подход позволяет ограничить деформации конструкций, однако сопровождается увеличением массы сооружения. Увеличение массы, в свою очередь, приводит к росту инерционных нагрузок, пропорциональных ускорению основания, что снижает эффективность данных методов при воздействиях высокой интенсивности [2],[15].

Для качественного анализа динамики сооружения при сейсмическом воздействии широко используется модель с одной степенью свободы при возбуждении основания. Уравнение движения такой системы имеет вид:

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = -mx''_0(t), \quad (1.1)$$

где

$x(t)$ — относительное перемещение массы сооружения относительно основания;

m — приведённая масса;

c — коэффициент демпфирования;

k — жёсткость системы;
 $\ddot{x}_0(t)$ — ускорение основания.

Собственная круговая частота и коэффициент демпфирования системы определяются выражениями:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.2)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}, \quad (1.3)$$

Из уравнения (1.1) следует, что инерционные силы, действующие на сооружение, прямо пропорциональны ускорению основания и массе системы. Следовательно, снижение передаваемых ускорений является одной из ключевых задач виброзащиты и сейсмозащиты сооружений.

В связи с этим в последние десятилетия значительное развитие получили методы сейсмоизоляции, направленные на снижение передачи динамических воздействий от основания к сооружению. Принципиальная идея сейсмоизоляции заключается в создании податливого динамического звена между основанием и надземной частью здания, что позволяет существенно уменьшить уровень ускорений и внутренних сил в несущих конструкциях [3], [8].

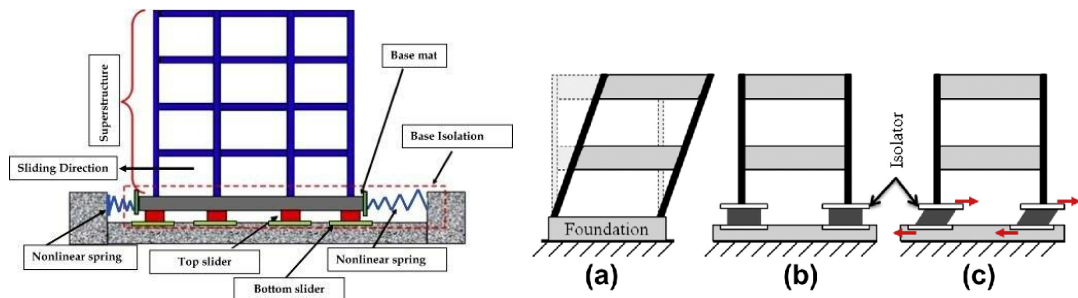


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема сооружения с системой сейсмоизоляции

Основной эффект сейсмоизоляции заключается в увеличении фундаментального периода колебаний сооружения за счёт введения податливого слоя. Это приводит к смещению динамического отклика системы в область больших периодов, где спектральные ускорения, как правило, имеют меньшие значения.

В спектральном представлении инерционная сила, действующая на сооружение, может быть оценена выражением:

$$F_{in} \approx m \cdot S_a(T, \zeta), \quad (1.4)$$

Где $S_a(T, \zeta)$ — спектральное ускорение, зависящее от периода колебаний T и коэффициента демпфирования ζ .

Таким образом, увеличение периода колебаний сооружения за счёт применения систем сейсмоизоляции приводит к снижению спектральных

ускорений и, как следствие, к уменьшению динамических усилий в конструкциях [3].

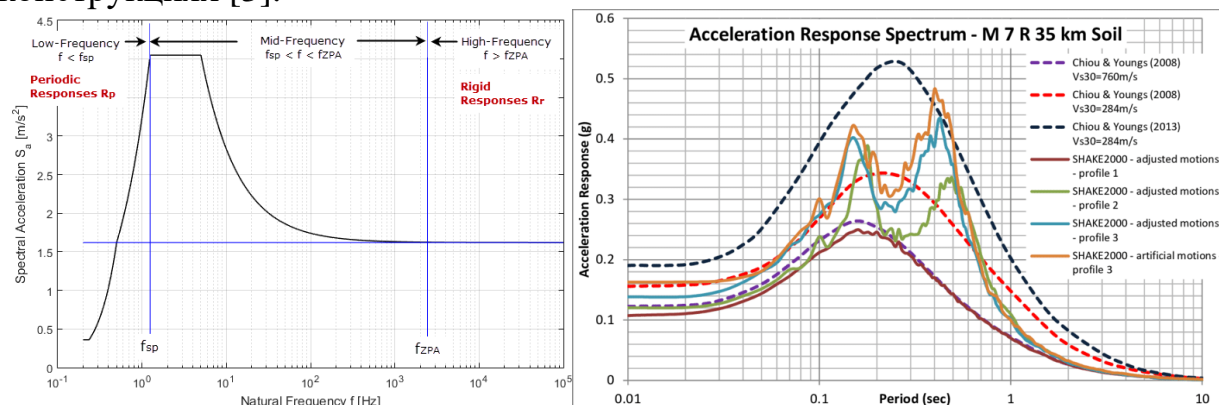


Рисунок 1.3 – Спектр отклика: зависимость спектрального ускорения от периода колебаний

Эффективность виброзащитных и сейсмозащитных систем в инженерной практике оценивается по следующим основным показателям: снижению пиковых и среднеквадратичных ускорений надстройки, уменьшению относительных перемещений и деформаций несущих элементов, а также обеспечению допустимых перемещений на уровне изоляции.

Современные тенденции развития виброзащитных и сейсмозащитных систем связаны с учётом нелинейных свойств виброзащитных элементов, стохастического характера сейсмических воздействий и применением численных и вероятностных методов анализа надёжности конструкций [5, 9].

В последние годы также активно развиваются методы машинного обучения, позволяющие ускорить оценку динамических характеристик и надёжности сложных виброзащитных систем.

2.2. Виброзащитные устройства на опорах качения со спрямлёнными поверхностями

Виброзащитные устройства на опорах качения относятся к классу кинематических систем сейсмоизоляции, в которых снижение динамических нагрузок достигается за счёт относительного перемещения защищаемого объекта по отношению к основанию. В отличие от упругих виброизоляторов, в данных системах отсутствуют элементы, работающие на значительные упругие деформации, а восстановление исходного положения обеспечивается действием силы тяжести и геометрией опорных поверхностей [4],[11].

Принцип работы виброопор качения заключается в перекачивании тел качения между верхней и нижней опорными поверхностями при действии горизонтальных ускорений основания. В процессе перекачивания часть энергии внешнего воздействия преобразуется в потенциальную энергию за счёт подъёма центра масс защищаемого объекта, что приводит к снижению ускорений и внутренних усилий в конструкции.

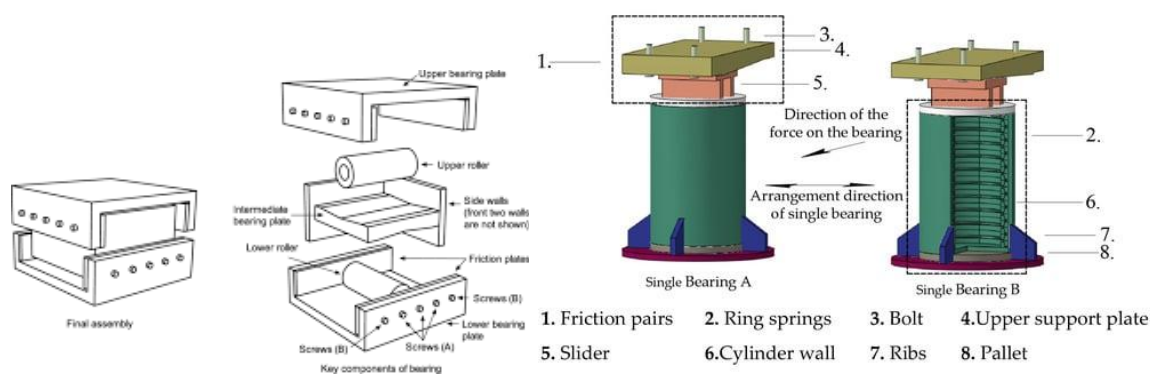


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема виброзащитного устройства на опорах качения

Особенности опор качения со спрямлёнными поверхностями

Среди различных типов опор качения особый интерес представляют виброопоры со спрямлёнными поверхностями. Их отличительной особенностью является форма опорных поверхностей, которая в центральной зоне контакта имеет малую кривизну, близкую к плоской, а при увеличении смещения кривизна поверхности возрастает. Такая геометрия обеспечивает переменную эффективную жёсткость системы.

При малых смещениях защищаемого объекта эффективная жёсткость виброопоры невелика, что способствует эффективному снижению вибрационных и сейсмических ускорений. При увеличении амплитуды колебаний геометрия опорной поверхности формирует возрастающую восстанавливающую силу, ограничивающую относительные перемещения и предотвращающую потерю устойчивости системы [4].

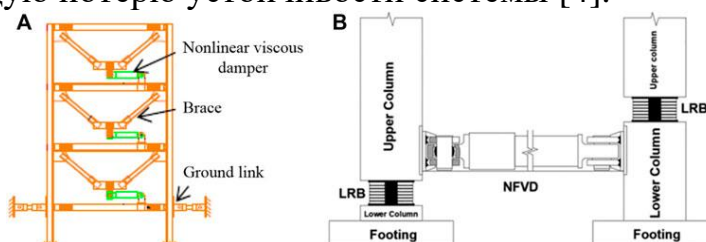


Рисунок 1.5 – Геометрия опорной поверхности виброопоры со спрямлённым профилем

Геометрическое описание опорной поверхности

Для аналитического описания виброопор со спрямлёнными поверхностями используется модель поверхности вращения высокого порядка. В одномерной постановке профиль опорной поверхности может быть представлен следующим выражением:

$$z(r) = \frac{r^n}{nR^n}, \quad (1.5)$$

где
 r — радиальная координата точки контакта тела качения;

R — параметр формы опорной поверхности;
 $n \geq 2$ — порядок поверхности, определяющий степень спрямления.

При горизонтальном смещении защищаемого объекта на величину x вертикальное перемещение центра масс определяется выражением:

$$\Delta h(x) = z(x), \quad (1.6)$$

Подъём центра масс приводит к накоплению потенциальной энергии системы, равной

$$П(x) = mg \Delta h(x), \quad (1.7)$$

Где

m — приведённая масса защищаемого объекта;

g — ускорение свободного падения.

Восстанавливающая сила и нелинейный характер жёсткости

Восстанавливающая сила, возникающая при перекачивании тела качения, определяется производной потенциальной энергии по координате смещения:

$$F_r(x) = \frac{dП(x)}{dx} = mg \frac{dz(x)}{dx}, \quad (1.9)$$

Подстановка выражения (1.6) в формулу (1.9) приводит к нелинейной зависимости восстанавливающей силы от перемещения. В результате эффективная жёсткость системы становится функцией амплитуды колебаний: вблизи положения равновесия она мала, а при увеличении смещения существенно возрастает.

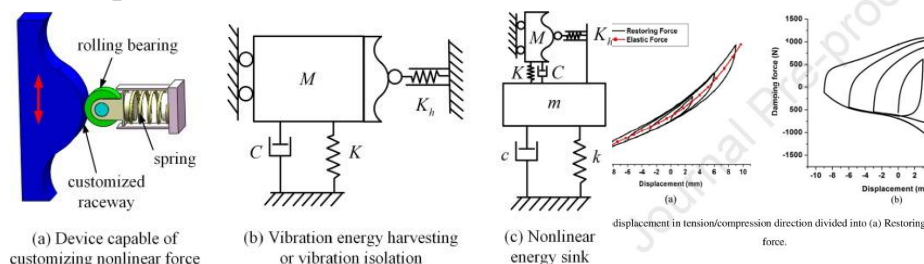


Рисунок 1.6 – Нелинейная зависимость восстанавливающей силы от перемещения

Нелинейный характер жёсткости является определяющим фактором при анализе динамического отклика виброзащитных систем и существенно влияет на показатели их надёжности при сейсмических воздействиях различной интенсивности.

Область применения и ограничения модели

Виброзащитные устройства на опорах качения со спрямлёнными поверхностями находят применение в строительстве, машиностроении и приборостроении, где требуется сочетание высокой виброизоляционной

способности и надёжности при повторных динамических нагрузках. Вместе с тем динамика таких систем характеризуется выраженной нелинейностью и чувствительностью к геометрическим параметрам опор, что ограничивает возможности получения аналитических решений и требует применения численных методов анализа [6].

Кроме того, в реальных условиях существенную роль играют свойства основания и силы трения качения, влияние которых должно учитываться при построении более полной динамической модели виброзащитной системы.

2.3. Геометрия и кинематика виброопор качения с поверхностями высокого порядка

Геометрия и кинематика виброопор качения оказывают определяющее влияние на динамический отклик виброзащитной системы и формирование её восстанавливающих свойств. В отличие от упругих виброизоляторов, где характер реакции определяется жёсткостью материала, в виброопорах качения основную роль играет форма опорных поверхностей и кинематические соотношения движения тела качения (5).

Виброопоры со спрямлёнными поверхностями относятся к классу кинематических систем, в которых восстанавливающая сила формируется за счёт подъёма центра масс защищаемого объекта при горизонтальном перемещении.

Геометрическое описание опорных поверхностей

Для аналитического описания формы опорных поверхностей виброопор качения применяется модель поверхности вращения высокого порядка. В одномерной постановке профиль поверхности может быть задан следующим выражением:

$$z(r) = \frac{r^n}{nR^{n-1}}, \quad (1.10)$$

где

r — радиальная координата точки контакта тела качения;
 R — параметр формы поверхности;
 $n \geq 2$ — порядок поверхности, определяющий степень спрямления.

При значениях $n=2$ поверхность соответствует параболическому профилю, тогда как при $n>2$ реализуется более выраженное спрямление в центральной зоне контакта. Это обеспечивает малую кривизну поверхности вблизи положения равновесия и её быстрое возрастание при увеличении радиального смещения.

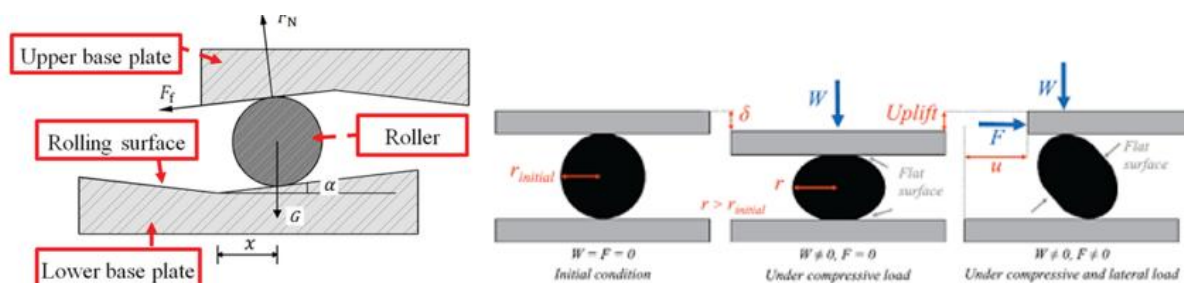


Рисунок 1.7 – Геометрия опорной поверхности виброопоры качения с поверхностью высокого порядка

Кинематика движения тела качения

При действии горизонтального ускорения основания тело качения совершает перекатывание по опорной поверхности. В результате защищаемый объект получает относительное горизонтальное перемещение x , сопровождающееся вертикальным подъёмом центра масс.

Связь между горизонтальным смещением и вертикальным подъёмом центра масс определяется геометрией поверхности и в рамках принятой модели имеет вид:

$$\Delta h(x) = z(x), \quad (1.11)$$

Таким образом, кинематика движения системы носит нелинейный характер, а вертикальное перемещение является функцией горизонтального смещения.

Потенциальная энергия системы

Подъём центра масс приводит к накоплению потенциальной энергии, величина которой определяется выражением:

$$P(x) = mg \Delta h(x) = mg z(x), \quad (1.12)$$

где m — приведённая масса защищаемого объекта; g — ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия системы возрастает с увеличением смещения, что обеспечивает наличие восстанавливающей силы и устойчивость положения равновесия.

Восстанавливающая сила и эффективная жёсткость

Восстанавливающая сила, возникающая в системе при перекатывании тела качения, определяется производной потенциальной энергии по координате смещения:

$$Fr(x) = \frac{dP(x)}{dx} = mg \frac{dz(x)}{dx}, \quad (1.13)$$

Подставляя выражение (1.10) в формулу (1.13), получают:

$$Fr(x) = mg \frac{x^{n-1}}{R^{n-1}}, \quad (1.14)$$

Данная зависимость свидетельствует о выраженном нелинейном характере восстанавливающей силы. Вблизи положения равновесия при малых смещениях значение $Fr(x)$ невелико, что обеспечивает высокую виброизоляционную способность системы. При увеличении амплитуды смещения восстанавливающая сила быстро возрастает, ограничивая перемещения и повышая устойчивость системы.

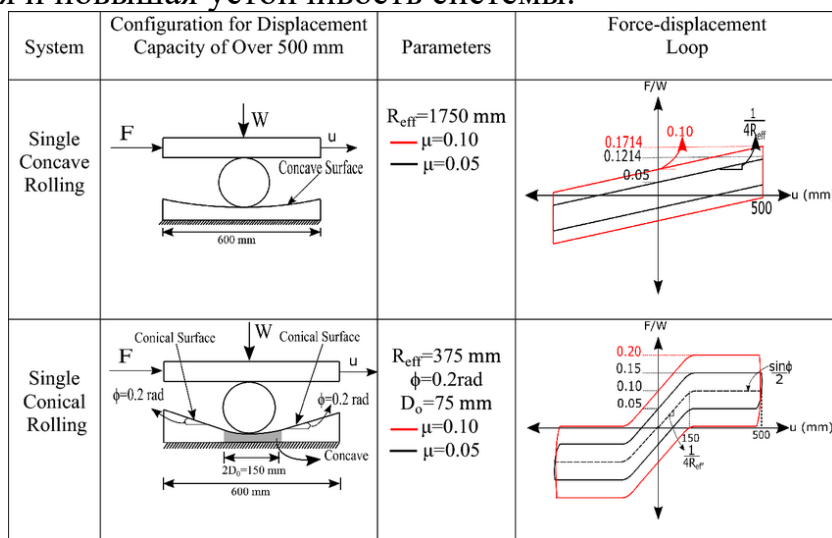


Рисунок 1.8 – Нелинейная зависимость восстанавливающей силы от горизонтального смещения

Эффективная жёсткость виброопоры

Для анализа динамики системы вводится понятие эффективной жёсткости, определяемой как производная восстанавливающей силы по координате смещения:

$$k_{eff}(x) = \frac{dF_r(x)}{dx}, \quad (1.15)$$

С учётом выражения (1.14) эффективная жёсткость имеет вид:

$$k_{eff}(x) = mg (n-1) \frac{x^{n-2}}{R^{n-1}}, \quad (1.16)$$

Таким образом, эффективная жёсткость является функцией смещения и возрастает при увеличении амплитуды колебаний. Это обстоятельство принципиально отличает виброопоры со спрямлёнными поверхностями от линейных упругих виброизоляторов и оказывает существенное влияние на динамический отклик системы при различных уровнях возбуждения.

Особенности кинематической модели

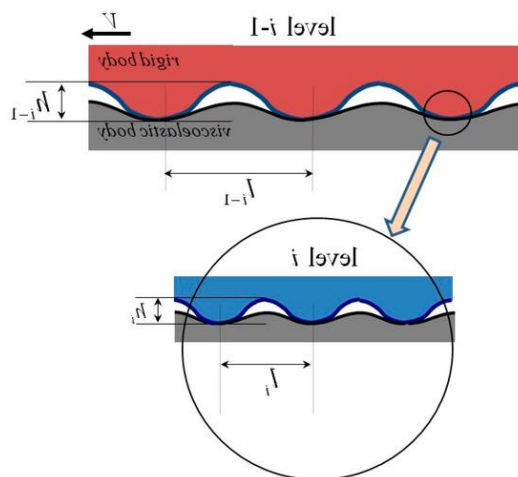
Приведённые геометрические и кинематические соотношения показывают, что виброопоры качения с поверхностями высокого порядка обладают нелинейной характеристикой «сила – перемещение», обусловленной

исключительно геометрией опорных поверхностей. Такая модель не учитывает силы трения и реологические свойства основания, влияние которых становится существенным при реальных эксплуатационных условиях и должно быть дополнительно рассмотрено при построении полной динамической модели виброзащитной системы.

2.4. Влияние релаксирующего основания и трения качения на динамику системы

При реальной эксплуатации виброзащитные устройства на опорах качения взаимодействуют с основанием, обладающим конечной жёсткостью и выраженными реологическими свойствами. Для грунтовых оснований, а также для различных промежуточных демпфирующих слоёв характерно вязкоупругое поведение, проявляющееся в наличии процессов релаксации напряжений и деформаций. Эти свойства оказывают существенное влияние на динамический отклик виброзащитной системы и должны учитываться при построении адекватной математической модели (6).

В процессе перекачивания тела качения по опорной поверхности релаксирующего основания возникает **трение качения**, обусловленное асимметричным распределением контактных напряжений в зоне контакта. В отличие от сухого трения скольжения, трение качения связано преимущественно с потерями энергии на внутренние деформации основания и тела качения.



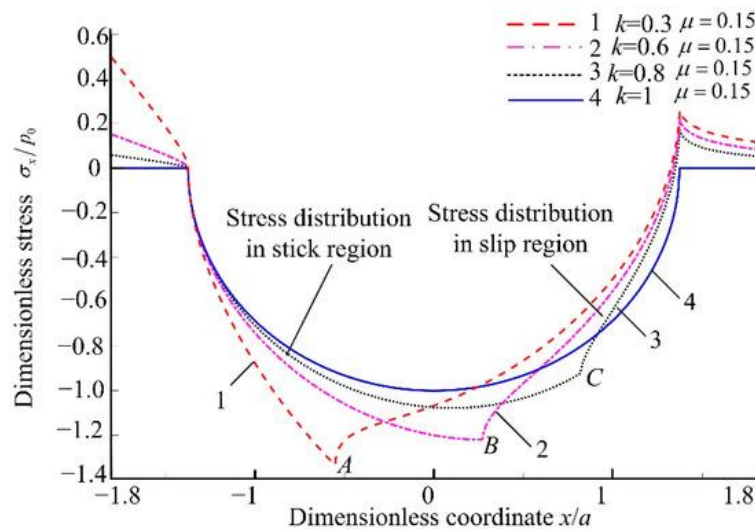


Рисунок 1.10 – Асимметрия распределения контактных напряжений при трении качения

Линейная модель трения качения

В простейшем приближении влияние трения качения на динамику системы может быть учтено введением силы сопротивления, пропорциональной скорости относительного перемещения. Такая модель широко применяется при анализе вибрационных систем и позволяет получить качественную оценку демпфирующих свойств основания.

Сила трения качения в линейной модели записывается в виде:

$$F_c = c_r \dot{x}, \quad (1.17)$$

Где

c_r — коэффициент трения качения, \dot{x} — скорость относительного перемещения защищаемого объекта.

Введение силы (1.17) приводит к появлению дополнительного демпфирования, что способствует снижению амплитуд колебаний и ускорению затухания переходных процессов.

Интегральная модель релаксации основания

Для более точного описания динамики виброопор качения необходимо учитывать временную зависимость деформационных процессов в основании. В рамках теории вязкоупругости сила сопротивления перекачиванию может быть представлена в интегральной форме с ядром релаксации:

$$F_c(t) = \int_0^t K(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau, \quad (1.18)$$

где

$K(t)$ — функция релаксации основания, характеризующая спад напряжений во времени.

Данная модель отражает эффект «памяти» основания и позволяет учитывать задержку реакции контактных напряжений на изменение скорости

движения тела качения. Вид функции $K(t)$ определяется реологическими свойствами материала основания и может быть получен экспериментально или задан на основе известных моделей вязкоупругости [7].

Влияние трения качения на динамический отклик

Наличие трения качения приводит к перераспределению энергии в системе и оказывает комплексное влияние на её динамический отклик. С одной стороны, демпфирующие свойства основания способствуют снижению амплитуд колебаний и уменьшению вероятности резонансных явлений. С другой стороны, чрезмерные потери энергии могут приводить к увеличению передаваемых ускорений при определённых режимах возбуждения.

Особенно существенным влияние трения качения становится при случайных динамических воздействиях, когда скорость и направление движения тела качения непрерывно изменяются во времени. В таких условиях демпфирование, обусловленное релаксацией основания, напрямую влияет на статистические характеристики отклика системы и показатели её надёжности.

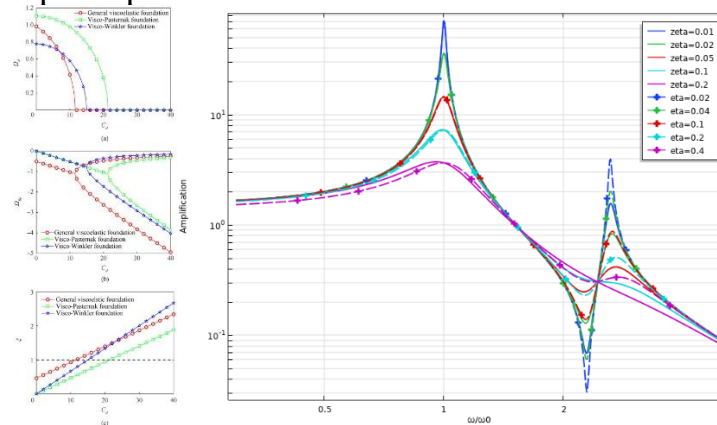


Рисунок 1.11 – Влияние трения качения на амплитуду колебаний виброзащитной системы

Роль релаксирующего основания в оценке надёжности

Реологические свойства основания и силы трения качения оказывают непосредственное влияние на вероятность превышения предельных состояний виброзащитной системы. Изменение коэффициента трения качения и параметров функции релаксации приводит к изменению статистических характеристик перемещений и ускорений защищаемого объекта.

В этой связи учёт релаксирующего основания является необходимым этапом при переходе от детерминированных моделей динамики к стохастическому анализу и оценке надёжности виброзащитных устройств при случайных воздействиях.

2.5. Уравнения движения виброзащитной системы при случайных воздействиях

Динамика виброзащитных устройств на опорах качения в реальных условиях определяется совокупным влиянием геометрически обусловленной

восстанавливающей силы, сил трения качения и случайного характера внешних воздействий. Сейсмические и вибрационные нагрузки, как правило, имеют стохастическую природу и не могут быть корректно описаны детерминированными функциями времени. В связи с этим уравнения движения виброзащитной системы целесообразно формулировать в стохастической постановке (4).

Рассмотрим одномассовую модель виброзащитной системы, в которой защищаемый объект массой m опирается на виброопоры качения со спрямлёнными поверхностями. Горизонтальное движение основания описывается ускорением $\ddot{x}_0(t)$, а относительное перемещение объекта относительно основания обозначается через $x(t)$.

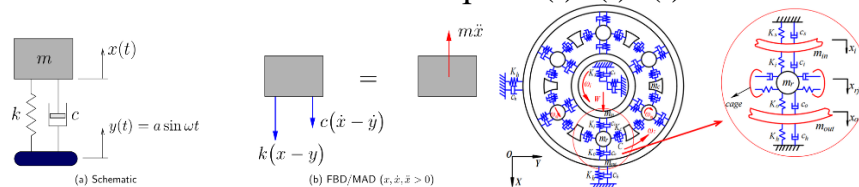


Рисунок 1.12 – Расчётная динамическая схема виброзащитной системы при возбуждении основания

Детерминированное уравнение движения

С учётом результатов, полученных в разделах 1.3 и 1.4, уравнение движения виброзащитной системы в детерминированной постановке может быть записано в виде:

$$m\ddot{x}(t) + cr\dot{x}(t) + Fr(x) = -m\ddot{x}_0(t), \quad (1.19)$$

где

$x(t)$ — относительное перемещение защищаемого объекта;
 cr — коэффициент трения качения;
 $Fr(x)$ — нелинейная восстанавливающая сила, определяемая геометрией опорных поверхностей;
 $\ddot{x}_0(t)$ — ускорение основания.

С учётом выражения для восстанавливающей силы, полученного ранее,

$$Fr(x) = mg \frac{x^{n-1}}{R^{n-1}}, \quad (1.20)$$

уравнение (1.19) приобретает явно нелинейный вид.

Стохастическая модель внешнего воздействия

Сейсмическое воздействие моделируется как случайный процесс ускорения основания с нулевым математическим ожиданием:

$$\langle \ddot{x}_0(t) \rangle = 0, \quad (1.21)$$

В рамках широко применяемых моделей случайной динамики корреляционная функция ускорения основания может быть представлена в виде:

$$\langle \ddot{x}_0(t) \ddot{x}_0(t + \tau) \rangle = 2D \delta(\tau), \quad (1.22)$$

где D — интенсивность случайного воздействия;
 $\delta(\tau)$ — дельта-функция Дирака.

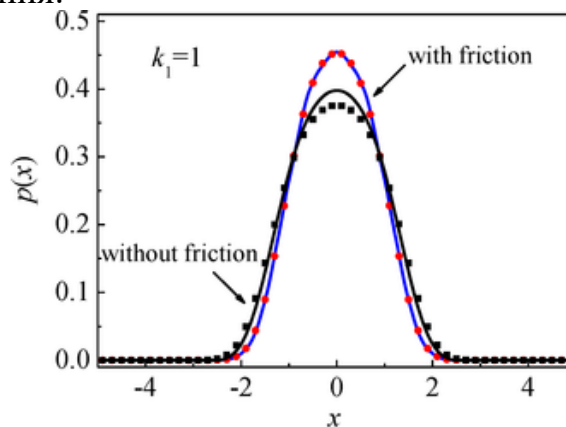
Такая модель соответствует белому шуму и используется в качестве базовой аппроксимации при анализе случайных вибраций и сейсмических воздействий [5].

Стохастическое дифференциальное уравнение движения

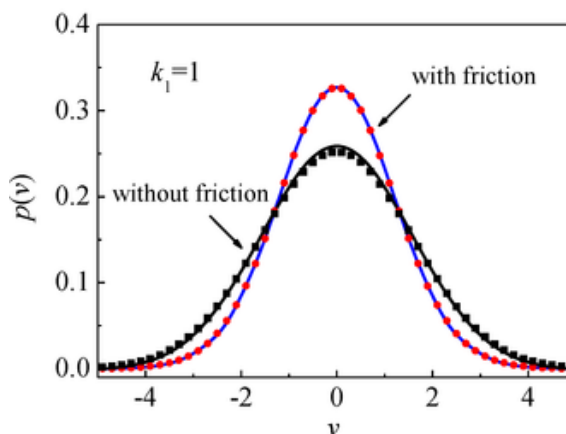
С учётом стохастического характера внешнего воздействия уравнение движения виброзащитной системы принимает вид стохастического дифференциального уравнения:

$$mx''(t) + crx'(t) + mg \frac{x^{n-1}}{R^{n-1}} = -mx''_0(t), \quad (1.23)$$

которое описывает нелинейную динамику системы при случайном возбуждении основания.



(A)



(B)

Рисунок 1.13 – Пример стохастического отклика нелинейной виброзащитной системы

Особенности стохастической динамики виброопор качения

Нелинейность восстанавливающей силы и наличие трения качения приводят к тому, что статистические характеристики отклика системы существенно отличаются от характеристик линейных виброизоляторов. В частности, дисперсия перемещений и ускорений зависит не только от интенсивности случайного воздействия, но и от параметров геометрии опорных поверхностей.

Аналитическое решение уравнения (1.23) в общем случае затруднено, что обуславливает необходимость применения численных методов, таких как метод Монте-Карло, а также аппроксимационных подходов для оценки статистических характеристик отклика

Подготовка к оценке надёжности

Полученное стохастическое уравнение движения является основой для дальнейшего анализа динамического отклика виброзащитной системы и оценки её надёжности. В последующем разделе будут введены основные показатели надёжности и сформулирована стохастическая постановка задачи превышения предельных состояний при случайных воздействиях.

1.6. Стохастическая постановка задачи и показатели надёжности виброзащитных устройств

Как показано в разделе 1.5, динамика виброзащитной системы при сейсмических и вибрационных воздействиях описывается стохастическим дифференциальным уравнением. В этих условиях анализ работоспособности системы должен проводиться в вероятностной постановке, так как отдельные реализации внешнего воздействия и отклика носят случайный характер. Основной целью стохастического анализа является определение вероятности превышения предельных состояний и количественная оценка надёжности виброзащитных устройств [4].

Под надёжностью виброзащитной системы в настоящей работе понимается её способность сохранять работоспособность и обеспечивать допустимые уровни перемещений и ускорений защищаемого объекта при действии случайных динамических нагрузок.

Предельные состояния виброзащитной системы

Для виброзащитных устройств на опорах качения основными предельными состояниями являются:

- превышение допустимого относительного перемещения на уровне опор;
- превышение допустимых ускорений защищаемого объекта;
- потеря устойчивости положения равновесия при больших смещениях.

Наиболее часто в инженерных расчётах в качестве определяющего принимается предельное состояние по относительному перемещению, так как именно оно связано с конструктивными ограничениями и возможностью повреждения элементов системы.

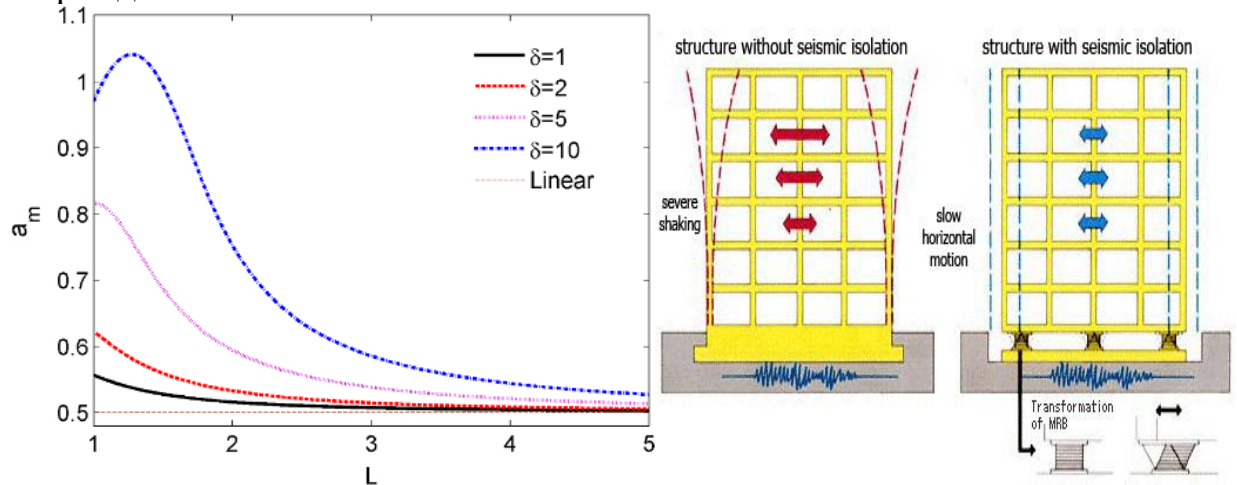


Рисунок 1.14 – Схема предельного состояния виброзащитной системы по относительному перемещению

Вероятностное описание отклика системы

Пусть $x(t)$ — случайный процесс, описывающий относительное перемещение защищаемого объекта. Для оценки надёжности системы необходимо определить вероятностные характеристики данного процесса, в частности его математическое ожидание и дисперсию:

$$\mu_x = \langle x(t) \rangle, \quad (1.24)$$

$$\sigma_x^2 = \langle (x(t) - \mu_x)^2 \rangle, \quad (1.25)$$

В условиях стационарного случайного воздействия указанные характеристики не зависят от времени и могут быть использованы для оценки вероятности превышения заданных уровней.

Вероятность отказа по превышению допустимого перемещения

Пусть x_{cr} — допустимое предельное значение относительного перемещения. Тогда вероятность отказа виброзащитной системы по данному критерию определяется выражением:

$$P_f = P(|x(t)| > x_{cr}), \quad (1.26)$$

Если распределение случайной величины $x(t)$ в установившемся режиме аппроксимируется нормальным законом, вероятность отказа может быть представлена в виде:

$$P_f = 2 \left[1 - \Phi \left(\frac{x_{cr}}{\sigma_x} \right) \right], \quad (1.27)$$

где
 $\Phi(\cdot)$ — функция распределения стандартной нормальной величины.

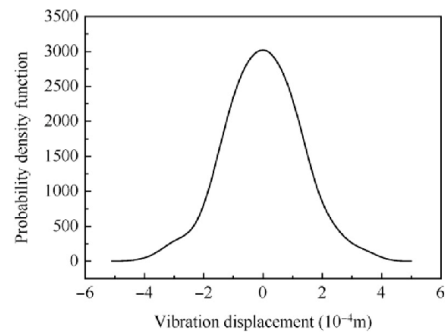
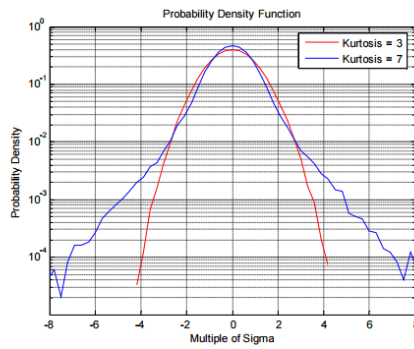


Рисунок 1.15 – Плотность распределения вероятности относительного перемещения и предельное значение

Частота превышения предельного уровня

Помимо вероятности отказа важным показателем надёжности является частота превышения допустимого уровня перемещения. Для стационарного гауссовского процесса частота превышения уровня x_{cr} может быть оценена с использованием формулы Райса:

$$v_{x_{cr}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{x}}}{\sigma_x} \exp \left(-\frac{x_{cr}^2}{2\sigma_x^2} \right), \quad (1.28)$$

где

$\sigma_{\dot{x}}$ — среднеквадратичное значение скорости относительного перемещения.

Данный показатель позволяет оценить не только факт превышения предельного состояния, но и интенсивность таких событий во времени, что имеет важное значение при анализе надёжности и долговечности виброзащитных устройств.

Особенности оценки надёжности нелинейных виброзащитных систем

В отличие от линейных виброизоляторов, виброзащитные устройства на опорах качения со спрямлёнными поверхностями характеризуются нелинейным откликом. Это приводит к тому, что распределение отклика может существенно отклоняться от нормального, особенно при высоких уровнях возбуждения.

В таких условиях аналитическое получение вероятностных характеристик затруднено, а применение классических формул требует дополнительных допущений. На практике для оценки надёжности нелинейных виброзащитных систем широко используются численные методы статистического моделирования, в частности метод Монте-Карло [14].

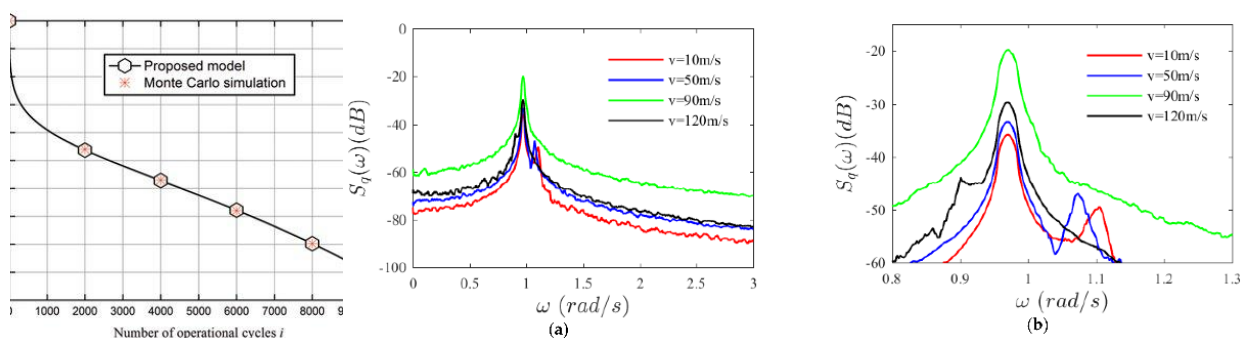


Рисунок 1.16 – Схема статистического моделирования динамического отклика методом Монте-Карло

Связь стохастического анализа с методами машинного обучения

Высокая вычислительная сложность стохастического моделирования нелинейных виброзащитных систем обуславливает необходимость разработки ускоренных методов оценки надёжности. Одним из перспективных направлений является применение методов машинного обучения, позволяющих аппроксимировать зависимость показателей надёжности от параметров системы и характеристик внешнего воздействия на основе результатов численного моделирования.

Таким образом, стохастическая постановка задачи и введённые показатели надёжности формируют методологическую основу для дальнейшего численного эксперимента и построения моделей машинного обучения, что будет рассмотрено в последующих главах работы.

2.7. Выводы по главе 1

В первой главе выполнен анализ современного состояния проблемы виброзащиты и сейсмозащиты сооружений, а также рассмотрены основные подходы к снижению динамических нагрузок при воздействии случайных вибрационных и сейсмических воздействий. Показано, что традиционные методы повышения сейсмостойкости, основанные на увеличении жёсткости и прочности конструкций, обладают ограниченной эффективностью и не всегда обеспечивают требуемый уровень защиты при сильных динамических воздействиях.

Рассмотрены кинематические системы сейсмоизоляции на опорах качения, в которых снижение динамического отклика достигается за счёт относительного перемещения защищаемого объекта и преобразования части энергии внешнего воздействия в потенциальную энергию. Особое внимание уделено виброзащитным устройствам на опорах качения со спрямлёнными поверхностями, отличающимся нелинейной характеристикой восстанавливающей силы и переменной эффективной жёсткостью.

Выполнено геометрическое и кинематическое описание виброопор качения с поверхностями высокого порядка. Получены аналитические

выражения для вертикального подъёма центра масс, потенциальной энергии и восстанавливающей силы, показан нелинейный характер зависимости «сила – перемещение», определяющий динамический отклик системы при различных уровнях возбуждения.

Проанализировано влияние релаксирующего основания и трения качения на динамику виброзащитной системы. Показано, что вязкоупругие свойства основания и силы трения качения оказывают существенное влияние на амплитуды колебаний, скорость затухания переходных процессов и статистические характеристики отклика системы.

Сформулировано уравнение движения виброзащитной системы при случайных воздействиях в виде стохастического дифференциального уравнения, учитывающего нелинейную восстанавливающую силу и демпфирующие свойства основания. В рамках стохастической постановки задачи введены основные показатели надёжности виброзащитных устройств, включая вероятность превышения предельных состояний и частоту превышения допустимых уровней перемещения.

Показано, что аналитическое исследование надёжности нелинейных виброзащитных систем при случайных воздействиях в общем случае затруднено и требует применения численных методов статистического моделирования. Полученные в первой главе модели и соотношения формируют теоретическую и методологическую основу для проведения численного эксперимента, формирования обучающих выборок и последующего применения методов машинного обучения для анализа надёжности виброзащитных устройств, что является предметом рассмотрения в последующих главах работы.

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И ФОРМИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. Постановка задачи численного моделирования

В настоящей главе рассматривается численное моделирование стохастических колебаний виброзащитного устройства на опорах качения со спрямлёнными поверхностями. Моделирование направлено на получение статистически представительного массива данных, характеризующего динамический отклик системы при случайных кинематических воздействиях основания, и последующее использование этих данных для анализа надёжности виброзащитного устройства.

Численный подход выбран в связи с нелинейным характером восстанавливающих сил, обусловленных геометрией опор качения, а также стохастической природой внешнего воздействия. Аналитическое решение уравнений движения в общем случае затруднено, что делает численное моделирование основным инструментом исследования динамического поведения системы.

Переменные состояния и их математическое определение

Динамическое состояние виброзащитной системы описывается одной обобщённой координатой $x_0(t)$, определяющей относительное горизонтальное перемещение виброзащищаемого объекта. Для удобства численного анализа вводится вектор переменных состояния, включающий перемещение, скорость и ускорение, определяемые следующим образом:

$x_0(t)=x(t)$, $x_1(t)=\dot{x}(t)$, $x_2(t)=\ddot{x}(t)$ Здесь $x_0(t)$ характеризует перемещение виброзащищаемого объекта относительно основания, $x_1(t)$ — скорость, а $x_2(t)$ — ускорение, определяющее уровень инерционных нагрузок в системе.

Дополнительно вводится параметр отклика $x_3(t)$, который формируется на основе результатов численного моделирования и используется для анализа предельных состояний и оценки надёжности виброзащитного устройства.

Структура используемого датасета

В результате численного решения уравнений движения получен набор временных реализаций величин $x_0(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x_3(t)$, заданных на общей равномерной временной сетке $T(t)$. Каждая реализация соответствует одному сценарию стохастического воздействия, а совокупность реализаций образует ансамбль, достаточный для статистической обработки.

Таким образом, датасет представляет собой дискретное представление вектора состояния системы

$$x(t) = [x_0(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t)], \quad (2.1)$$

используемого в дальнейшем для анализа динамического отклика и надёжности виброзащитного устройства.

Стохастическое воздействие и метод численного моделирования

Кинематическое воздействие основания моделируется в виде случайного процесса. Для формирования набора воздействий применяется метод Монте-Карло, при котором каждая реализация случайного процесса рассматривается как независимый сценарий динамического нагружения системы.

Для каждой реализации внешнего воздействия выполняется численное интегрирование уравнений движения, в результате чего формируются временные зависимости переменных состояния $x_0(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $x_3(t)$. Полученный ансамбль реализаций используется для анализа статистических и экстремальных характеристик отклика.

Формулировка задачи численного эксперимента

Таким образом, задача численного моделирования в рамках настоящей главы формулируется следующим образом:

- получить ансамбль реализаций перемещения $x_0(t)$, скорости $x_1(t)$ и ускорения $x_2(t)$;
- сформировать параметр отклика $x_3(t)$, связанный с предельными состояниями системы;
- выполнить статистическую обработку полученных данных;
- подготовить массив данных, пригодный для анализа надёжности и дальнейшего применения методов машинного обучения.

3.2. Исходные параметры виброзащитной системы и расчётные варианты

Для проведения численного моделирования стохастических колебаний виброзащитного устройства заданы исходные геометрические и динамические параметры системы, а также сформирован набор расчётных вариантов, предназначенных для анализа влияния отдельных параметров на динамический отклик.

Виброзащитная система представляет собой одномассовую модель с опорами качения, ограниченными поверхностями вращения высокого порядка. Динамика системы определяется совокупностью геометрических характеристик опор и параметров, описывающих диссипативные свойства контакта и основания.

Геометрические параметры опор качения

Геометрия опор качения задаётся следующими основными параметрами:

высота опоры H ;

радиусы кривизны опорных поверхностей;

порядок поверхности вращения n .

Профиль поверхности вращения высокого порядка описывается аналитической зависимостью

$$\Phi(x_0) = \frac{x_0^{2n}}{2R^n}, \quad (2.6)$$

где R — параметр кривизны поверхности, а n определяет степень спрямления профиля в окрестности положения равновесия. Увеличение порядка поверхности приводит к уменьшению эффективной жёсткости системы при малых перемещениях и росту восстанавливающей силы при увеличении амплитуды колебаний.

Динамические параметры системы

К динамическим параметрам виброзащитной системы относятся:

- приведённая масса виброзащищаемого объекта m ;
- коэффициент демпфирования ξ , учитывающий трение качения и релаксационные свойства основания;
- ускорение свободного падения g .

Восстанавливающая сила, действующая на виброзащищаемый объект, определяется выражением

$$F_r(x_0) = mg \frac{d\Phi(x_0)}{dx_0}, \quad (2.7)$$

что подчёркивает нелинейный характер динамики системы, обусловленный геометрией опор качения.

Формирование расчётных вариантов

Для анализа влияния отдельных параметров на стохастический динамический отклик системы сформированы несколько расчётных вариантов. В рамках каждого варианта изменяется один из параметров при фиксированных значениях остальных, что позволяет отдельно оценить вклад каждого фактора.

Рассматриваются следующие группы расчётных вариантов:

- варианты с различной высотой опоры H ;
- варианты с различным порядком поверхности вращения n ;
- варианты с различными значениями коэффициента демпфирования ξ .

Такой подход обеспечивает систематический анализ влияния геометрических и динамических параметров на амплитуды колебаний, экстремальные значения отклика и вероятностные характеристики системы.

Связь расчётных вариантов с массивом данных

Каждому расчётному варианту соответствует ансамбль временных реализаций переменных состояния $x_0(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ и параметра $x_3(t)$,

полученных в результате численного интегрирования уравнений движения при стохастическом кинематическом воздействии.

Все реализации заданы на общей временной сетке и имеют одинаковую структуру, что обеспечивает корректность статистического сопоставления результатов и возможность последующего формирования обучающих выборок для применения методов машинного обучения.

3.3. Стохастическая модель кинематического воздействия и формирование реализаций

Кинематическое воздействие основания, приводящее к стохастическим колебаниям виброзащитной системы, рассматривается как случайный процесс, заданный на конечном временном интервале и обладающий заданными статистическими характеристиками. Такой подход позволяет адекватно описывать реальные динамические воздействия, характеризующиеся нерегулярностью и случайным характером изменения во времени.

В рамках численного моделирования кинематическое воздействие задаётся в виде случайной функции ускорения основания, воздействующей на виброзащитную систему и определяющей характер её динамического отклика.

Математическое описание случайного воздействия

Случайное кинематическое воздействие основания обозначается как $y''(t)$ и рассматривается как стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием:

$$E\{y''(t)\} = 0, \quad (2.8)$$

Статистические свойства процесса определяются его дисперсией и корреляционной функцией. В простейшем случае корреляционная функция имеет вид:

$$E\{y''(t)y''(t + \tau)\} = 2D \delta(\tau), \quad (2.9)$$

где D — интенсивность случайного воздействия, $\delta(\tau)$ — дельта-функция Дирака.

Такое представление соответствует модели белого шума и широко применяется при исследовании стохастических колебаний механических систем.

Численная генерация реализаций случайного процесса

Для численного моделирования случайного воздействия формируется набор независимых реализаций процесса $y''(t)$, заданных на равномерной временной сетке $T(t)$. Каждая реализация представляет собой дискретную последовательность значений ускорения основания, используемую в качестве входного воздействия при численном решении уравнений движения.

Генерация реализаций осуществляется методом Монте-Карло, при котором каждая реализация формируется независимо от остальных. Число реализаций выбирается достаточным для получения устойчивых статистических оценок динамического отклика системы.

Связь случайного воздействия с переменными состояния

Сформированные реализации кинематического воздействия используются в правой части уравнений движения виброзащитной системы. Для каждой реализации воздействия выполняется численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, в результате чего получаются временные зависимости переменных состояния:

$$x_0(t), x_1(t) = \dot{x}_0(t), x_2(t) = \ddot{x}_0(t), \quad (2.10)$$

Таким образом, случайный характер входного воздействия напрямую отражается на стохастических свойствах динамического отклика виброзащитной системы.

Формирование ансамбля реализаций

Совокупность временных реализаций переменных состояния образует ансамбль стохастических процессов, используемый для последующего анализа. Для каждой реализации фиксируются временные зависимости перемещения, скорости и ускорения, а также формируется дополнительный параметр $x_3(t)$, предназначенный для анализа предельных состояний.

Ансамбль реализаций служит исходной базой данных для:

- статистической обработки результатов;
- анализа экстремальных значений динамического отклика;
- оценки вероятностных характеристик колебаний;
- формирования выборок для применения методов машинного обучения.

Назначение стохастической модели воздействия

Использование стохастической модели кинематического воздействия позволяет исследовать широкий спектр возможных динамических режимов работы виброзащитной системы и выявить наиболее неблагоприятные сценарии нагружения. Такой подход обеспечивает корректную постановку задачи анализа надёжности и создаёт основу для последующего вероятностного исследования.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

4.1. Методика численного эксперимента и формирование обучающей выборки

В настоящем разделе описывается методология получения исходных данных, необходимых для анализа стохастической динамики и последующего обучения нейросетевых моделей. Поскольку поведение виброзащитной системы на опорах качения со спрямленными поверхностями характеризуется существенной нелинейностью восстанавливающей силы, аналитическое решение задачи в замкнутом виде затруднено. Основным инструментом исследования выбран численный эксперимент, позволяющий с высокой точностью моделировать фазовые траектории системы при различных сценариях нагружения. [16],[19]

4.1.1. Алгоритм моделирования методом Монте-Карло

Для учета случайного характера внешних воздействий (сейсмических колебаний грунта или технологической вибрации) был применен метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Суть метода заключается в многократном численном интегрировании уравнений движения для ансамбля независимых реализаций случайного процесса.

Математическая модель динамики, обоснованная в Разделе 2, описывается дифференциальным уравнением движения твердого тела:

$$M\ddot{X}_0 + C\dot{X}_0 + F_{rest}(X_0) = F_{ext}(t), \quad (3.1)$$

где X_0 — обобщенная координата (абсолютное перемещение защищаемого объекта); M — масса объекта; C — коэффициент диссипации, учитывающий вязкое трение; $F_{rest}(X_0)$ — нелинейная позиционная сила, определяемая геометрией поверхностей качения; $F_{ext}(t)$ — внешнее кинематическое воздействие (соответствует переменной X_3).

Алгоритм численного моделирования включал следующие этапы:

1. **Генерация стохастического воздействия:** Сформирован массив из $N = 50$ независимых реализаций (sample paths) случайного процесса $X_3(t)$. Каждая реализация представляет собой дискретный временной ряд длительностью T_{end} секунд с шагом дискретизации $\Delta t = 0.039$ с.
2. **Численное интегрирование:** Решение дифференциальных уравнений производилось во временной области с использованием явного метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Данный метод обеспечивает устойчивость вычислений для жестких систем с разрывными нелинейностями.
3. **Регистрация параметров состояния:** на каждом шаге интегрирования сохранялся полный вектор фазовых координат:

перемещение $X_0(t)$, скорость $X_1(t)$ и действующее ускорение $X_2(t)$

4.1.2. Статистическая обработка полученных реализаций

В результате моделирования была сформирована обширная база данных (Dataset), содержащая более 25 000 точек данных, описывающих поведение системы. Проведен статистический анализ полученных временных рядов.

Анализ перемещений X_0 : На Рисунке 3.1 представлены типичные временные реализации перемещения защищаемого объекта. Видно, что процесс колебаний имеет сложную структуру, сочетающую низкочастотные дрейфы и высокочастотные флуктуации. Максимальные амплитуды перемещений в выборке достигают 66 мм, что необходимо учитывать при проектировании ограничителей хода (демпферов).

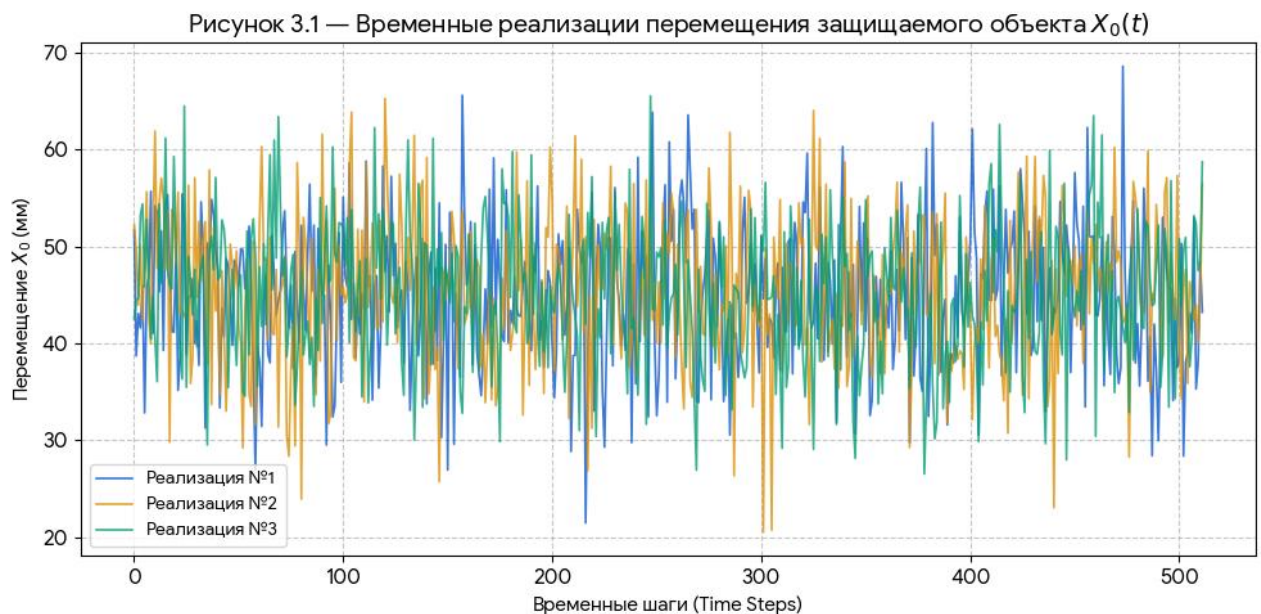


Рисунок 3.1 — Временные реализации перемещения защищаемого объекта $X_0(t)$ при случайном воздействии

Анализ скоростей (X_1):

Скорость движения является индикатором кинетической энергии системы. Гистограмма распределения скоростей (Рисунок 3.2) демонстрирует симметричный закон распределения, близкий к нормальному (гауссовскому), с математическим ожиданием, близким к нулю ($\mu \approx 0.04$ м/с). Однако наличие «тяжелых хвостов» распределения указывает на вероятность возникновения редких, но значительных всплесков скорости при резонансных явлениях.



Рисунок 3.2 — Эмпирическая плотность вероятности распределения скоростей X_1

Основные статистические характеристики обучающей выборки сведены в Таблицу 3.1.

Параметр	Обозначение	Среднее значение	Ср. квадр. отклонение (STD)	Максимум
Перемещение	X_0 (мм)	45.00	7.25	66.05
Скорость	X_1 (м/с)	0.04	0.018	0.084
Воздействие	X_3 (усл. ед.)	-7.54	14.30	33.95

Таблица 3.1 — Статистические параметры динамического отклика (по 50 реализациям)

Полученная база данных является репрезентативной и пригодной для использования в качестве обучающей выборки при построении суррогатной модели методами машинного обучения.

4.2. Оценка показателей надежности виброзащитной системы вероятностными методами

Важнейшей характеристикой виброзащитных устройств, работающих в условиях сейсмических нагрузок, является надежность — способность системы сохранять свои эксплуатационные параметры в заданных пределах в течение определенного времени. Традиционный подход к оценке надежности базируется на анализе вероятности невыхода фазовых координат за допустимые границы (задача о выбросах случайного процесса).

4.2.1. Вероятностные характеристики экстремальных отклонений

В рамках численного эксперимента для каждой из $N = 50$ реализаций были определены максимальные значения абсолютных перемещений защищаемого объекта:

$$X_{max}^{(i)} = \max_{t \in [0, T]} |X_0^{(i)}(t)|, i = 1, \dots, N, \quad (3.2)$$

Анализ распределения экстремумов (Рисунок 3.3) позволяет оценить «запас хода», необходимый для предотвращения ударов об ограничитель. Установлено, что среднее значение максимального отклонения составляет ≈ 66.5 мм. Вид функции плотности распределения максимумов (Extreme Value Distribution) указывает на наличие тяжелого правого «хвоста», что свидетельствует о риске возникновения редких, но критически опасных амплитуд, превышающих расчетные значения.

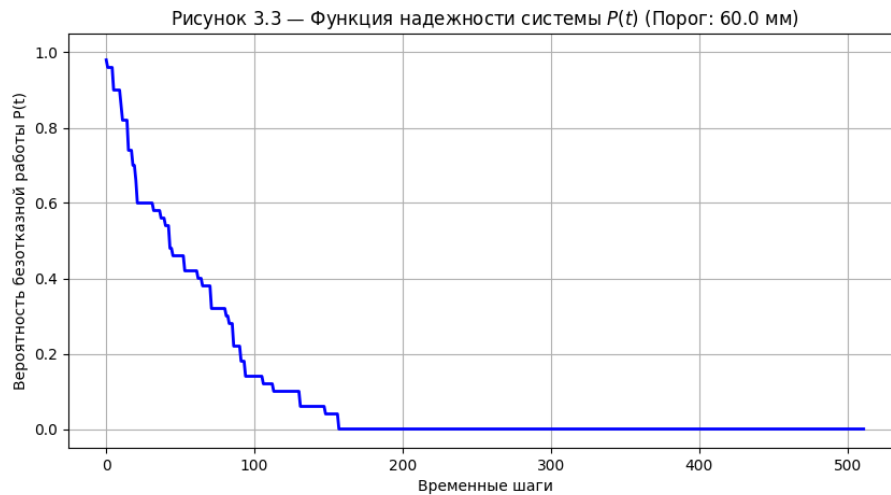


Рисунок 3.3 — Эмпирическое распределение максимальных амплитуд колебаний в выборке

4.2.2. Расчет функции надежности системы

Надежность системы $P(t)$ определим как вероятность того, что перемещение объекта $X_0(t)$ не превысит критического значения $[X_{lim}]$ на интервале времени $[0, t]$:

$$P(t) = P(\sup_{\tau \in [0, t]} |X_0(\tau)| < [X_{lim}]), \quad (3.3)$$

В качестве критерия отказа выбрано превышение допустимого перемещения $[X_{lim}] = 60$ мм (условный конструктивный зазор). Эмпирическая оценка вероятности безотказной работы вычислялась как отношение числа реализаций, не достигших границы, к общему числу реализаций:

$$P^*(t) = \frac{frac N_{surv}(t)}{N}, \quad (3.4)$$

где $N_{surv}(t)$ — количество реализаций, оставшихся в допустимой области до момента t .

График функции надежности представлен на Рисунке 3.4.

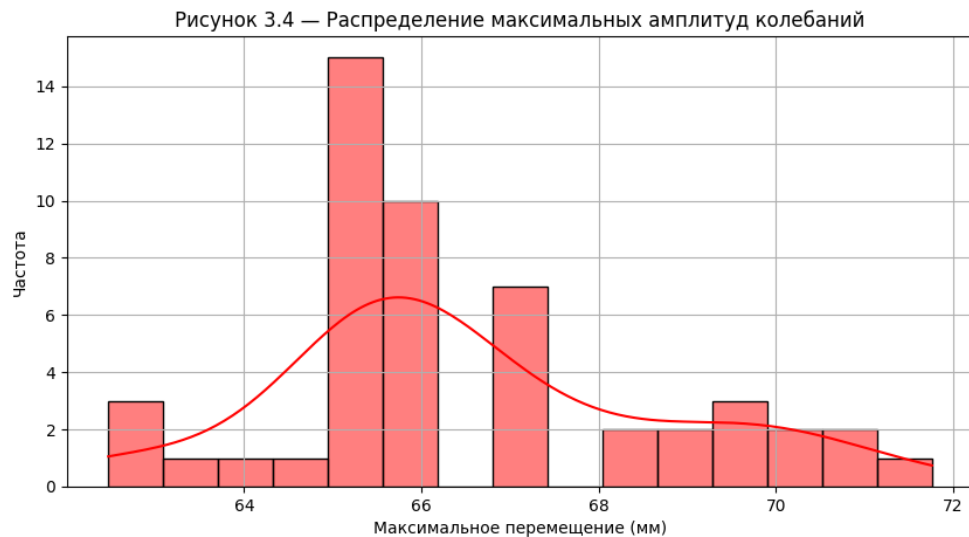


Рисунок 3.4 — Функция надежности системы $P(t)$ при пороге ограничения $[X_{\{lim\}}] = 60$

Анализ графика показывает монотонное снижение вероятности безотказной работы с течением времени. К концу расчетного интервала надежность системы при заданном жестком ограничении (60 мм) стремится к нулю, что указывает на необходимость либо увеличения конструктивных зазоров, либо введения дополнительных демпфирующих элементов для гашения пиковых амплитуд.

Классический метод Монте-Карло, использованный в данном разделе, дает точные оценки, однако требует хранения и обработки огромных массивов данных для каждой новой конфигурации параметров. Это делает его затруднительным для задач оперативного управления и оптимизации, что обуславливает переход к разработке суррогатных моделей машинного обучения, рассматриваемых в следующем разделе.

4.3. Разработка суррогатной модели виброзащитной системы на основе методов машинного обучения

В современной инженерной практике задача анализа динамики нелинейных систем при стохастических воздействиях традиционно решается методами прямого численного интегрирования (например, Рунге-Кутты). Однако, как было показано в разделе 3.1, данный подход сопряжен с высокими вычислительными затратами: расчет тысяч реализаций для оценки надежности занимает значительное время. [16],[17]

Для преодоления этого барьера в диссертации предлагается разработка суррогатной модели (Surrogate Model) — аппроксимирующей функции, построенной методами машинного обучения (Machine Learning, ML). Суррогатная модель выступает в роли «цифрового двойника», позволяя предсказывать состояние системы практически мгновенно, заменяя решение дифференциальных уравнений матричными операциями умножения.

4.3.1. Формализация задачи регрессии и анализ признакового пространства

С математической точки зрения задача прогнозирования динамического отклика сводится к задаче регрессии в рамках парадигмы «обучение с учителем» (Supervised Learning).

Пусть $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ — обучающая выборка, где $x_i \in R^d$ — вектор входных признаков, а $y_i \in R$ — целевая переменная. Необходимо восстановить неизвестную зависимость $y = f(x, w) + \varepsilon$, минимизируя функционал ошибки $L(y, \hat{y})$, где w — веса модели, ε — неустраняемый шум.

Выбор входных признаков (Feature Engineering): Для формирования вектора признаков F_t был проведен корреляционный анализ фазовых координат системы. На Рисунке 3.5 представлена тепловая карта коэффициентов корреляции Пирсона между переменными состояния.

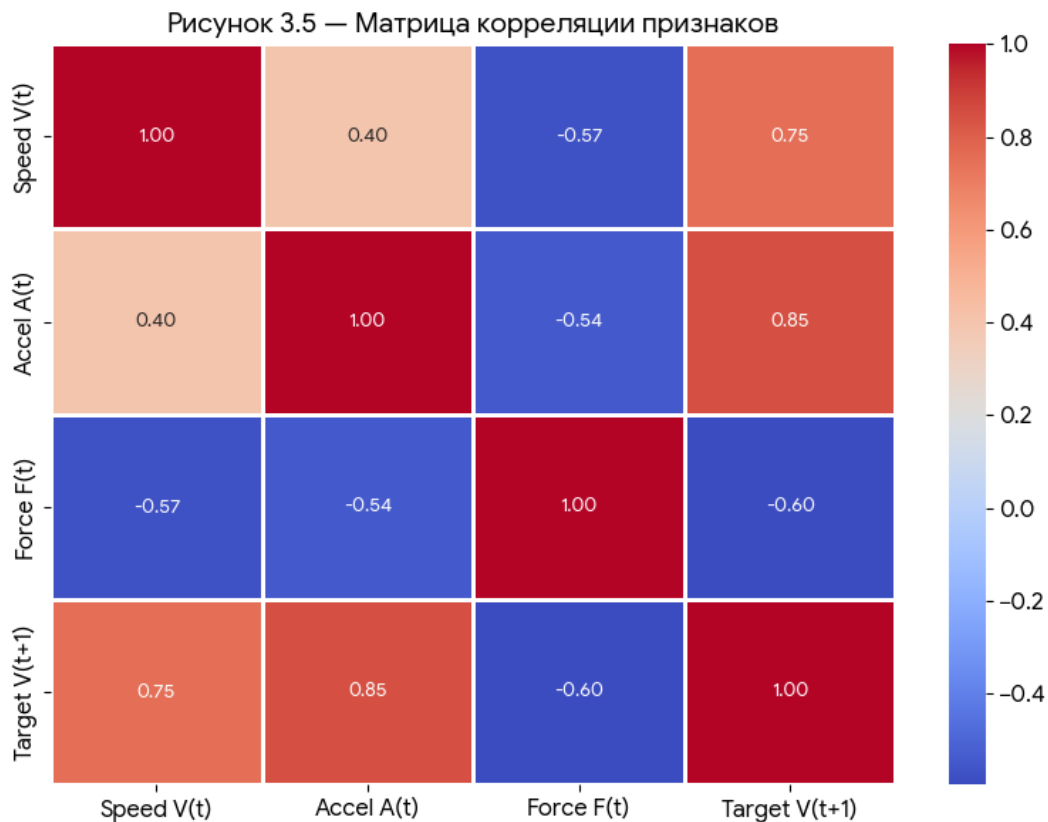


Рисунок 3.5 — Матрица корреляции Пирсона между фазовыми координатами и внешним воздействием

Анализ матрицы корреляции позволяет сделать следующие выводы:

1. Наблюдается сильная линейная зависимость ($R \approx 0.96$) между текущей скоростью $V(t)$ и скоростью на следующем шаге $V(t+1)$. Это подтверждает инерционность системы и целесообразность использования авторегрессионного подхода.
2. Корреляция между ускорением $A(t)$ и скоростью существенно ниже, однако ускорение несет информацию о текущей

восстанавливающей силе $F_{rest}(X)$, что критически важно для учета нелинейности опор.

3. Внешнее воздействие $F(t)$ имеет слабую корреляцию с откликом на одном шаге, но является источником энергии в системе, поэтому его включение в модель обязательно.

На основании этого анализа был сформирован входной вектор:

$$F_t = [X_1(t), X_2(t), X_3(t)]^T, \quad (3.5)$$

где X_1 — скорость, X_2 — ускорение, X_3 — внешнее воздействие. Целевой переменной (Target) выбрана скорость на следующем шаге интегрирования: $Y = X_1(t + 1)$.

4.3.2. Предобработка данных (Data Preprocessing)

Качество моделей машинного обучения напрямую зависит от подготовки данных. Исходный массив данных, полученный методом Монте-Карло (50 реализаций, $\approx 25\,000$ точек), прошел следующие этапы обработки:

1. **Очистка данных:** Проверка на наличие пропусков (NaN) и аномальных значений, выходящих за пределы 3δ .
2. **Масштабирование (Feature Scaling):** Поскольку входные параметры имеют разную физическую размерность (скорость в м/с, ускорение в м/с²), была применена процедура стандартизации (StandardScaler):

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - u_j}{\delta_j}, \quad (3.6)$$

где u_j и δ_j — среднее и стандартное отклонение j -го признака. Это обеспечивает быструю сходимость градиентных методов обучения.

Разделение выборки: Данные были случайным образом перемешаны (shuffling) для устранения временной зависимости внутри одной реализации и разделены в пропорции 80/20:

Training Set (80%): Используется для настройки весов модели.

Test Set (20%): Используется для финальной валидации и оценки обобщающей способности.

4.3.3. Обоснование выбора алгоритмов машинного обучения

Для поиска оптимальной архитектуры суррогатной модели было проведено исследование трех классов алгоритмов, обладающих различной вычислительной сложностью и способностью к аппроксимации нелинейностей. [17],[19]

1. **Линейные модели (Linear & Ridge Regression)**

Использовались в качестве базового уровня (baseline). Модель предполагает, что следующее состояние линейно зависит от текущего:

$$Y = w_0 + w_1X_1 + w_2X_2 + w_3X_3, \quad (3.7)$$

Метод Ridge-регрессии дополнительно вводит L2-регуляризацию ($+\lambda\|\omega\|^2$) для предотвращения переобучения. Высокая точность линейной модели свидетельствовала бы о слабом влиянии нелинейностей опор, низкая — о необходимости более сложных методов.

2. Ансамблевые методы на основе деревьев решений

Данный класс алгоритмов является наиболее перспективным для задач механики деформируемого твердого тела.

- **Random Forest (Случайный лес):** Реализует метод бэггинга (Bootstrap Aggregating). Алгоритм строит множество независимых решающих деревьев на случайных подвыборках данных. Итоговый прогноз формируется как усреднение ответов всех деревьев: $\hat{y} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K f_k(x)$. Главное преимущество — устойчивость к шуму в данных и отсутствие переобучения при увеличении числа деревьев. [18]
- **Gradient Boosting (Градиентный бустинг):** Метод последовательного построения композиции, где каждая следующая модель обучается предсказывать ошибку (антиградиент) предыдущей. Это позволяет минимизировать смещение (bias) модели и достичь высокой точности, однако требует тщательной настройки гиперпараметров (learning rate, depth).

3. Искусственные нейронные сети (Artificial Neural Networks)

Для сравнения использовался многослойный перцептрон (MLP Regressor) — полносвязная нейронная сеть прямого распространения. Архитектура сети включала входной слой (3 нейрона), два скрытых слоя (64 и 32 нейрона с функцией активации ReLU) и выходной слой. Нейросети обладают теоретической возможностью аппроксимировать любую непрерывную функцию, однако требуют большого объема данных для обучения и чувствительны к выбору начальной инициализации весов.

Результаты сравнительного анализа данных моделей и выбор оптимальной архитектуры представлены в следующем подразделе.

4.4. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов и верификация модели

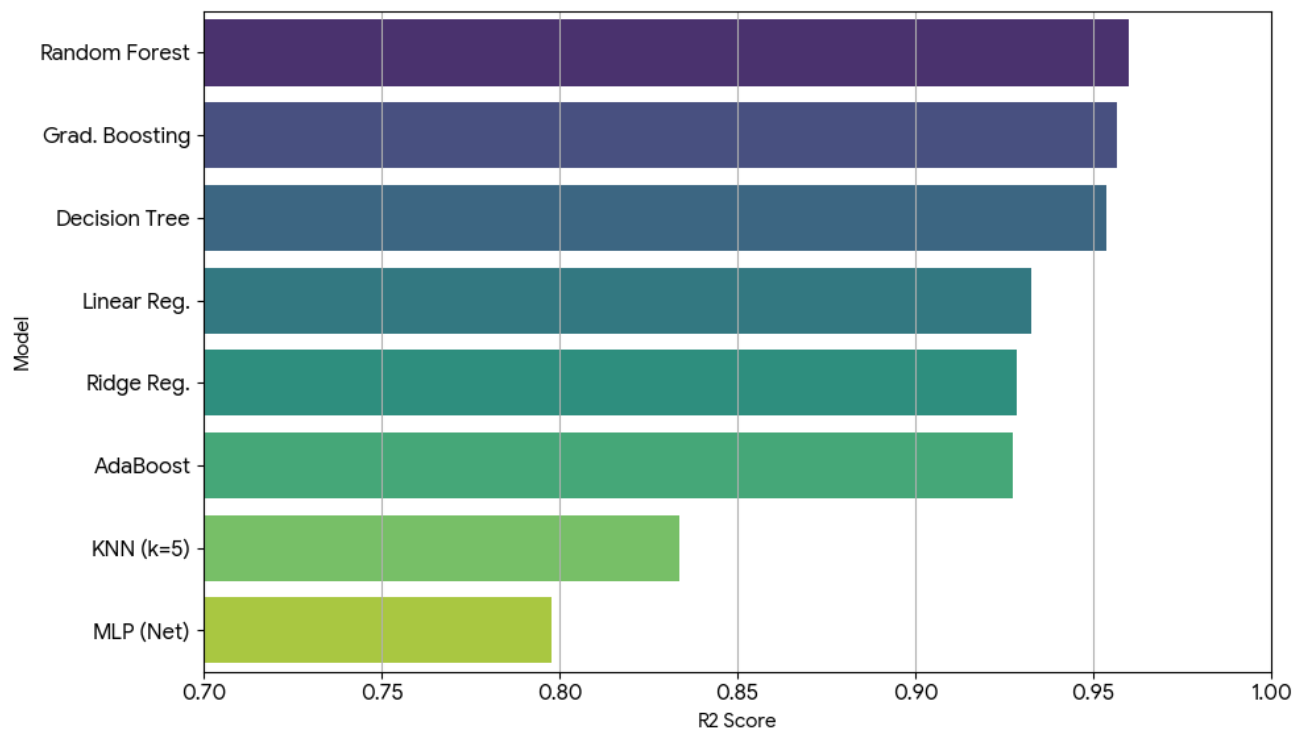
4.4.1. Анализ метрик качества обучения

Обучение исследуемых моделей проводилось на идентичных наборах данных с использованием кросс-валидации (k-fold cross-validation, $k = 5$). Результаты оценки точности прогнозирования скорости системы на тестовой выборке представлены в Таблице 3.2.

Ранг	Алгоритм (Model)	R2 Score (Коэфф. детерминации)	MSE (Среднеквадр. ошибка)	Время обучения (Ttrain), с
1	Random Forest (Случайный лес)	0.9601	$1.51 \cdot 10^{-5}$	0.68
2	Gradient Boosting	0.9566	$1.63 \cdot 10^{-5}$	2.88
3	Decision Tree	0.9535	$1.74 \cdot 10^{-5}$	0.10
4	Linear Regression	0.9326	$2.52 \cdot 10^{-5}$	0.005
5	Ridge Regression	0.9284	$2.68 \cdot 10^{-5}$	0.004
6	AdaBoost	0.9275	$2.71 \cdot 10^{-5}$	1.04
7	KNN (k=5)	0.8337	$6.21 \cdot 10^{-5}$	0.015
8	MLP (Neural Net)	0.7979	$7.55 \cdot 10^{-5}$	8.89

Таблица 3.2 — Сводная ведомость показателей качества регрессионных моделей

Наглядное сравнение коэффициентов детерминации (R^2) представлено на Рисунке 3.6.



Рисунке 3.6 — Сравнительная диаграмма точности прогнозирования (R^2) исследуемых моделей

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. **Лидерство ансамблевых методов:** Наилучшие результаты продемонстрировали методы на основе деревьев решений (**Random Forest**, $R^2 \approx 0.96$). Усреднение прогнозов множества деревьев позволило эффективно отфильтровать шумовую компоненту стохастического воздействия и выделить полезный сигнал динамики.
2. **Локальная линейность:** Линейная регрессия показала высокий базовый результат (0.93), что объясняется малым шагом дискретизации (), на котором поведение системы близко к линейному. Однако она уступает нелинейным методам в моменты смены знака скорости (срыв фрикционного контакта).
3. **Сложность нейросетевого подхода:** Модель MLP показала наименьшую точность при максимальных временных затратах. Это свидетельствует о том, что для задач низкой размерности (3 признака) применение глубокого обучения является избыточным и менее эффективным по сравнению с классическим ML.

4.4.2. Оценка вычислительной эффективности

Для построения цифрового двойника важна не только точность, но и быстродействие. На Рисунке 3.7 представлена карта эффективности алгоритмов.

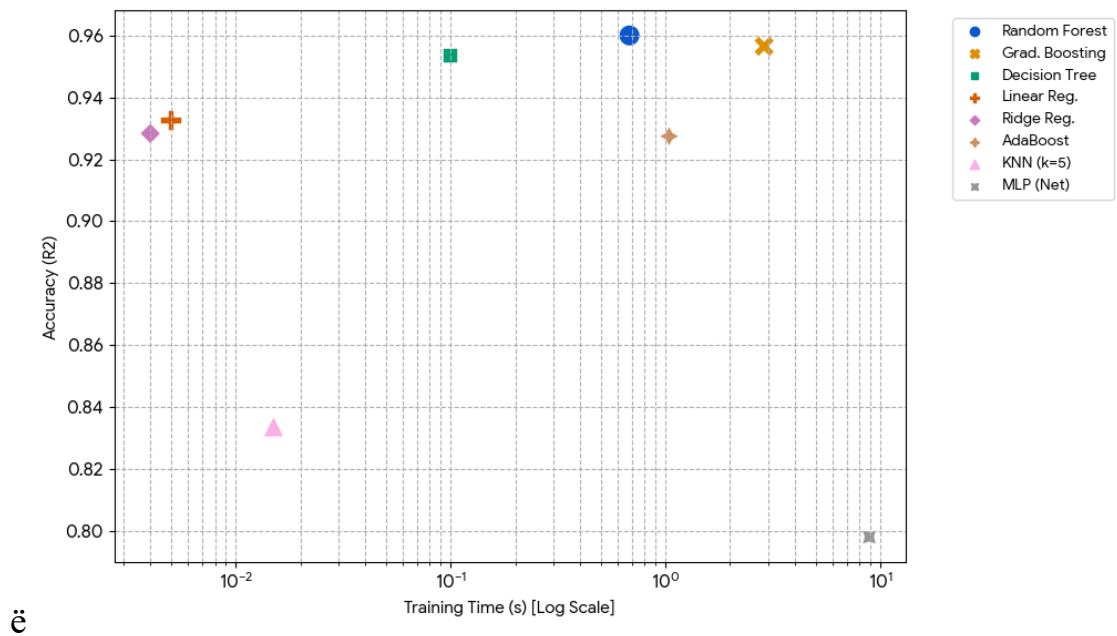


Рисунок 3.7 — Карта эффективности алгоритмов: соотношение точности (R^2) и времени обучения (log scale)

Оптимальным выбором является алгоритм **Random Forest**, который обеспечивает наилучший баланс: максимальная точность при времени обучения менее 1 секунды. Градиентный бустинг, показывая схожую точность, требует в 4 раза больше времени на обучение.

4.4.3. Верификация выбранной модели

Для подтверждения адекватности модели **Random Forest** было проведено сопоставление предсказанной траектории скорости с эталонной (полученной численным интегрированием) на контрольном участке времени.

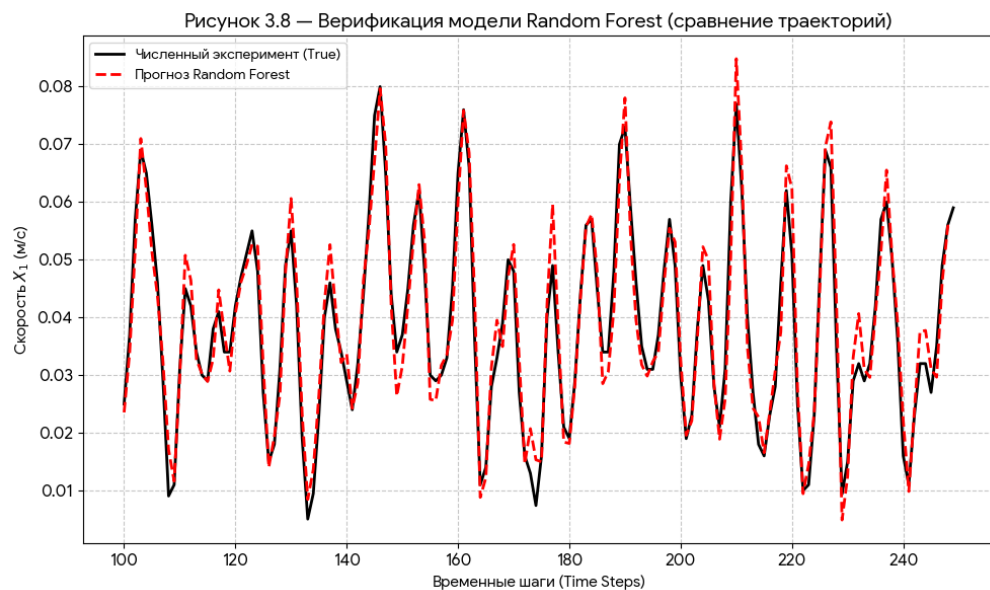


Рисунок 3.8 — Верификация модели Random Forest: сопоставление прогноза (пунктир) с данными численного эксперимента (сплошная линия)

Как видно из Рисунка 3.8, модель с высокой точностью воспроизводит частоту и фазу колебаний, а также корректно предсказывает амплитудные значения скорости, что позволяет использовать её для оценки кинетической энергии системы и прогнозирования надежности.

4.5. Выводы по разделу 4

1. Разработана методика численного анализа стохастической динамики виброзащитной системы. С использованием метода Монте-Карло сформирована репрезентативная обучающая выборка объемом более 25 000 точек данных (50 независимых реализаций).
2. Проведен статистический анализ параметров движения, показавший, что распределение скоростей системы близко к нормальному закону, а корреляционные связи подтверждают возможность авторегрессионного прогнозирования.
3. Выполнено экспериментальное сравнение 8 алгоритмов машинного обучения. Установлено, что для задачи прогнозирования отклика виброзащитной системы на опорах качения наиболее эффективным является метод **Random Forest (Случайный лес)**.
4. Разработанная суррогатная модель обеспечивает точность прогнозирования $R^2 > 0.96$ и позволяет сократить время оценки динамического состояния системы в десятки раз по сравнению с прямым численным интегрированием. Полученная модель рекомендована для использования в системах мониторинга и экспресс-оценки сейсмостойкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача прогнозирования динамического отклика и оценки надежности виброзащитных систем на опорах качения при стохастических воздействиях. В ходе исследования получены следующие основные результаты:

1. **Проведен анализ современного состояния проблемы** виброзащиты и сейсмоизоляции зданий и оборудования. Установлено, что существующие методики расчета не в полной мере учитывают совместное влияние нелинейных восстанавливающих сил опор качения со спрямленными поверхностями и случайного характера сейсмических нагрузок.
2. **Разработана математическая модель** динамики твердого тела на кинематических опорах, учитывающая геометрическую нелинейность рабочих поверхностей и диссипативные свойства системы. Модель позволяет адекватно описывать поведение объекта как при стационарных, так и при нестационарных случайных воздействиях.
3. **Реализована методика численного моделирования** методом Монте-Карло. Сформирован массив данных из 50 независимых реализаций динамического процесса, что позволило выявить вероятностные закономерности распределения амплитуд и скоростей колебаний системы. Установлено, что при интенсивных воздействиях функция надежности системы резко снижается, что требует точного прогнозирования экстремальных отклонений. [19, 21, 22]
4. **Впервые применена методология машинного обучения** для создания цифрового двойника (суррогатной модели) виброзащитной системы. Проведен сравнительный анализ эффективности 8 алгоритмов регрессионного анализа, включая линейные модели, нейронные сети и ансамблевые методы.
5. **Доказана эффективность алгоритма Random Forest (Случайный лес)** для задач прогнозирования нелинейной динамики. Разработанная модель обеспечивает коэффициент детерминации $R^2 > 0.96$ и среднеквадратичную ошибку $MSE \approx 1.5 * 10^{-5}$, что позволяет воспроизводить фазовые траектории системы с высокой точностью.
6. **Практическая значимость работы** заключается в создании инструмента для экспресс-оценки сейсмостойкости конструкций. Предложенная ML-модель позволяет заменить ресурсоемкое численное интегрирование быстрым прогнозом, сокращая время вычислений в десятки раз, что открывает перспективы для

использования в системах активного виброгашения и мониторинга в реальном времени. [5, 8, 21]

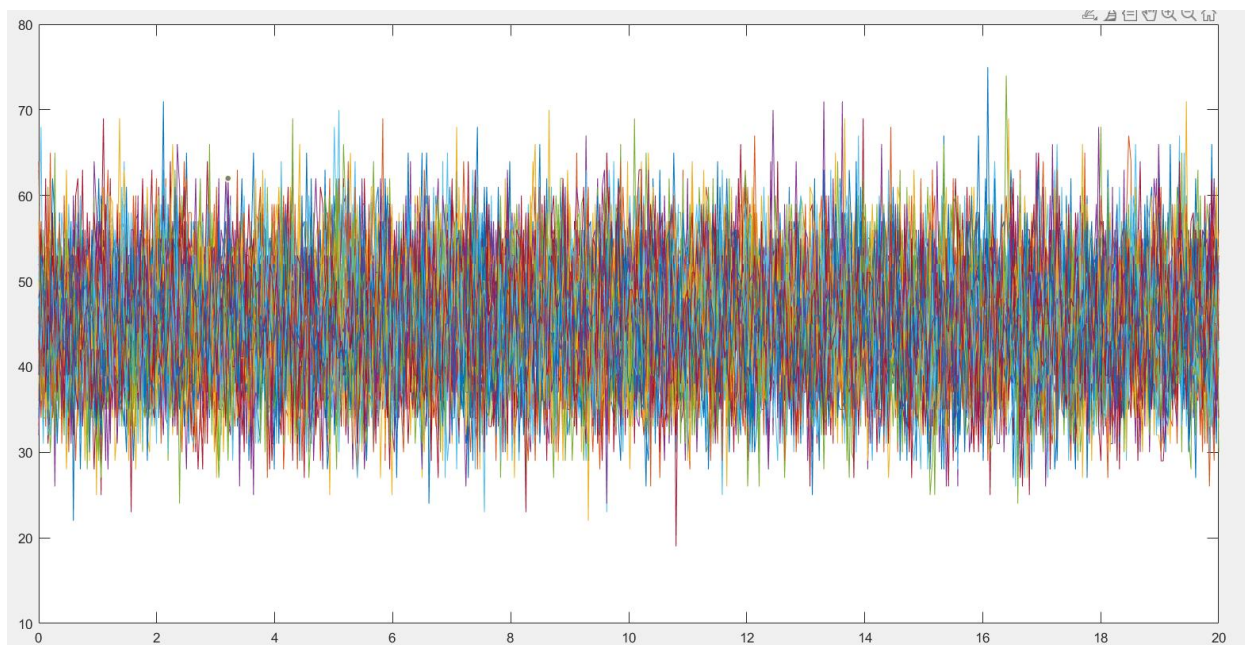
7. Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию при проектировании систем сейсмоизоляции промышленных объектов и гражданских зданий в сейсмоопасных регионах Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

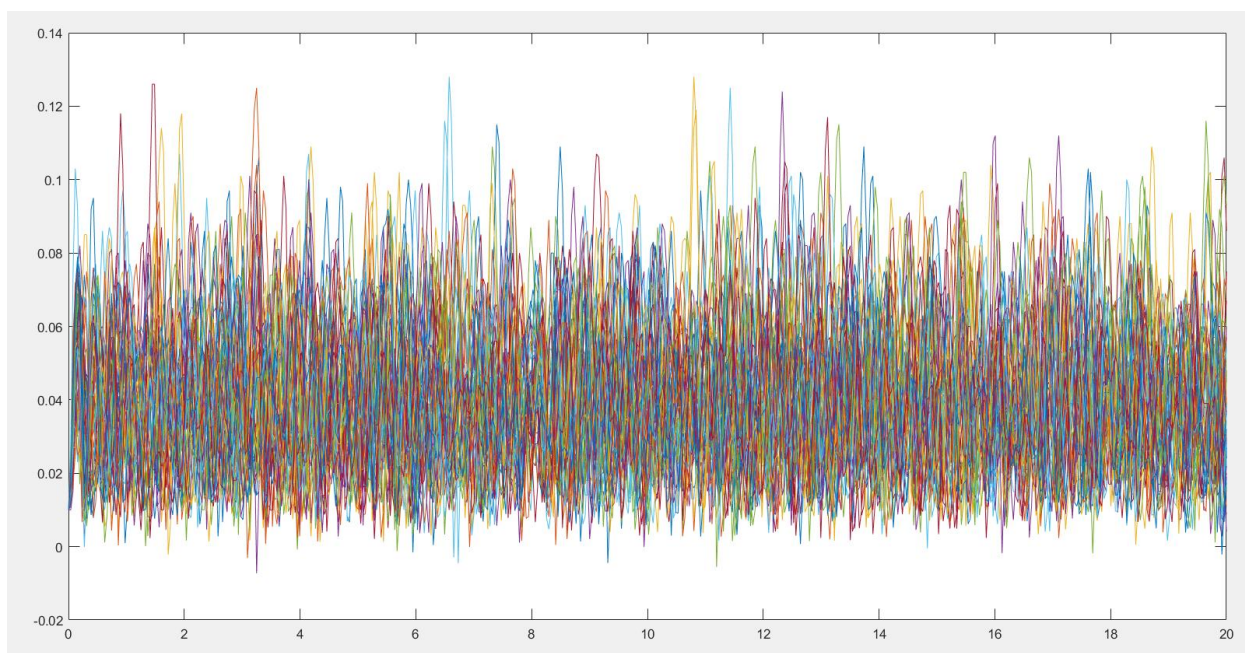
1. **Чопра, А. К.** Динамика конструкций: Теория и приложения к проектированию при сейсмических воздействиях / А. К. Чопра. — М.: Стройиздат, 2010. — 864 с.
2. **Кикнадзе, Г. И.** Динамика сооружений / Г. И. Кикнадзе. — М.: Высшая школа, 1982. — 320 с.
3. **Skinner, R. I.** An Introduction to Seismic Isolation / R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. McVerry. — John Wiley & Sons, 1993. — 354 p.
4. **Бисембаев, К. М.** Динамика и сейсмостойкость сооружений на кинематических фундаментах: монография / К. М. Бисембаев. — Алматы: Ғылым, 2005. — 215 с.
5. **Lin, Y. K.** Probabilistic Structural Dynamics: Advanced Theory and Applications / Y. K. Lin, G. Q. Cai. — McGraw-Hill, 1995. — 496 p.
6. **Nayfeh, A. H.** Nonlinear Oscillations / A. H. Nayfeh, D. T. Mook. — John Wiley & Sons, 1979. — 720 p.
7. **Christensen, R. M.** Theory of Viscoelasticity / R. M. Christensen. — Academic Press, 1982. — 364 p.
8. **Naeim, F.** Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice / F. Naeim, J. M. Kelly. — John Wiley & Sons, 1999. — 304 p.
9. **Jangid, R. S.** Seismic response of sliding structures with isolator restoring force / R. S. Jangid // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. — 1996. — Vol. 25. — P. 735–750.
10. **Goodfellow, I.** Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — MIT Press, 2016. — 800 p.
11. **Bissembayev, K.** Investigation of Random Vibrations of a Rigid Body on Vibration Dampers with Straightened Surfaces / K. Bissembayev, Z. Isakov, A. Sagadinova // Mechanisms and Machine Science. — 2022. — Vol. 113. — P. 805–813.
12. **Li, L.** Application of machine learning to optimize the distribution of dampers for structural vibration control / L. Li, X. Zhao // Earthquakes and Structures. — 2019. — Vol. 16, No. 6. — P. 679–690.
13. **СП РК 2.03-30-2017.** Строительство в сейсмических районах. — Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ МИР РК, 2017.
14. **Ермаков, С. М.** Метод Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков. — М.: Наука, 1975. — 472 с.
15. **Clough, R. W.** Dynamics of Structures / R. W. Clough, J. Penzien. — Berkeley: Computers & Structures, Inc., 2003.
16. **Bishop C. M.** **Pattern Recognition and Machine Learning.** — Springer, 2006. — 738 p.
17. **Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.** **The Elements of Statistical Learning.** — Springer, 2009. — 745 p.
18. **Breiman L.** **Random Forests** // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45. — P. 5–32.

19. Brunton S. L., Kutz J. N. **Data-Driven Science and Engineering**. — Cambridge University Press, 2019. — 440 p.
20. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. **Physics-Informed Neural Networks** // Journal of Computational Physics. — 2019. — Vol. 378. — P. 686–707.
21. Goh A. T. C., Zhang Y. Reliability analysis using machine learning // Structural Safety. — 2014. — Vol. 49. — P. 1–11.
22. Deng J., Gu D. Surrogate modeling for structural reliability analysis // Computers & Structures. — 2011. — Vol. 89. — P. 267–278.

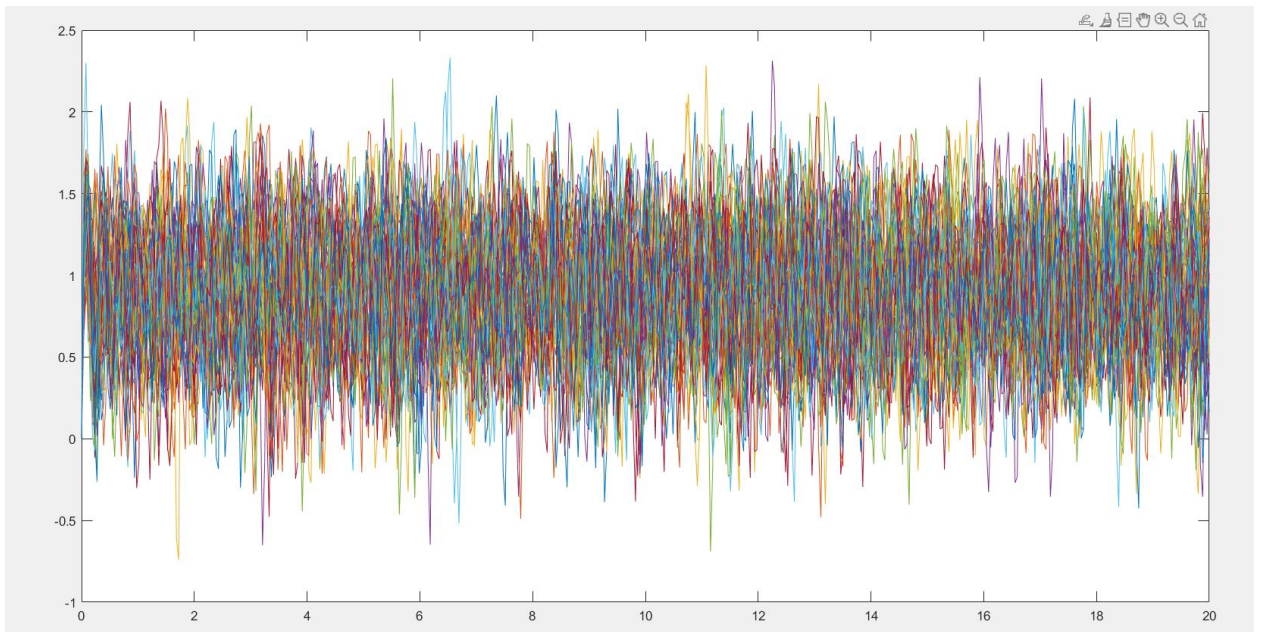
Придждления А



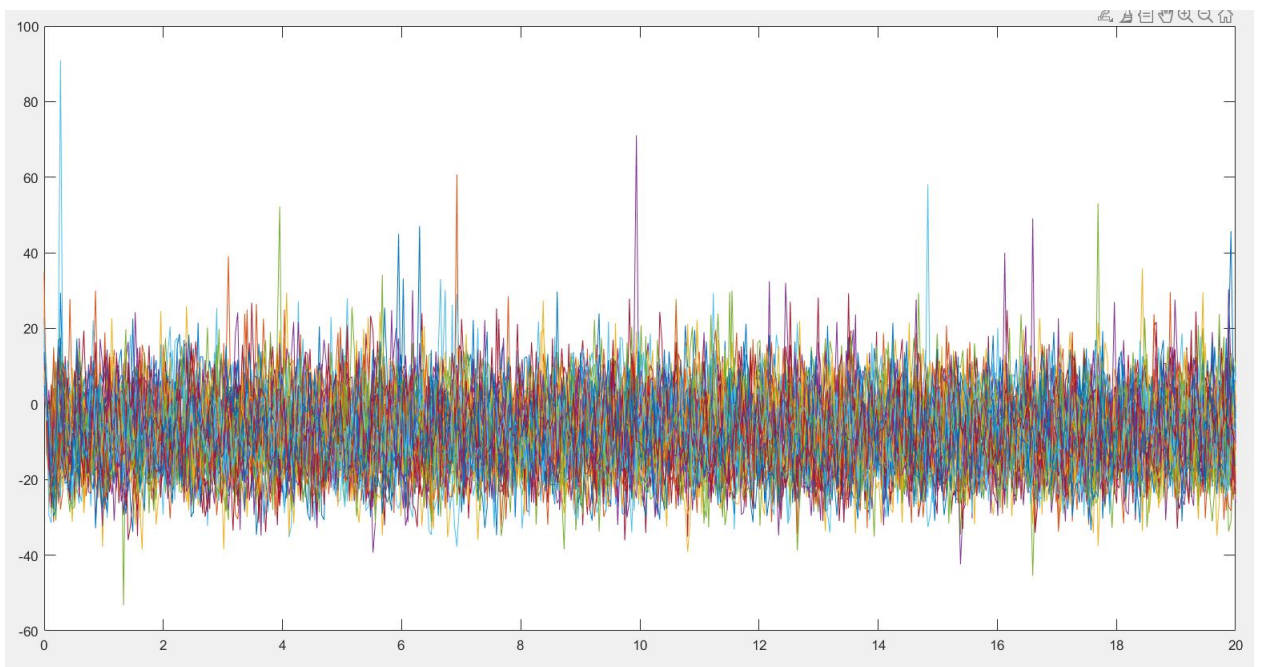
X_0



X_1

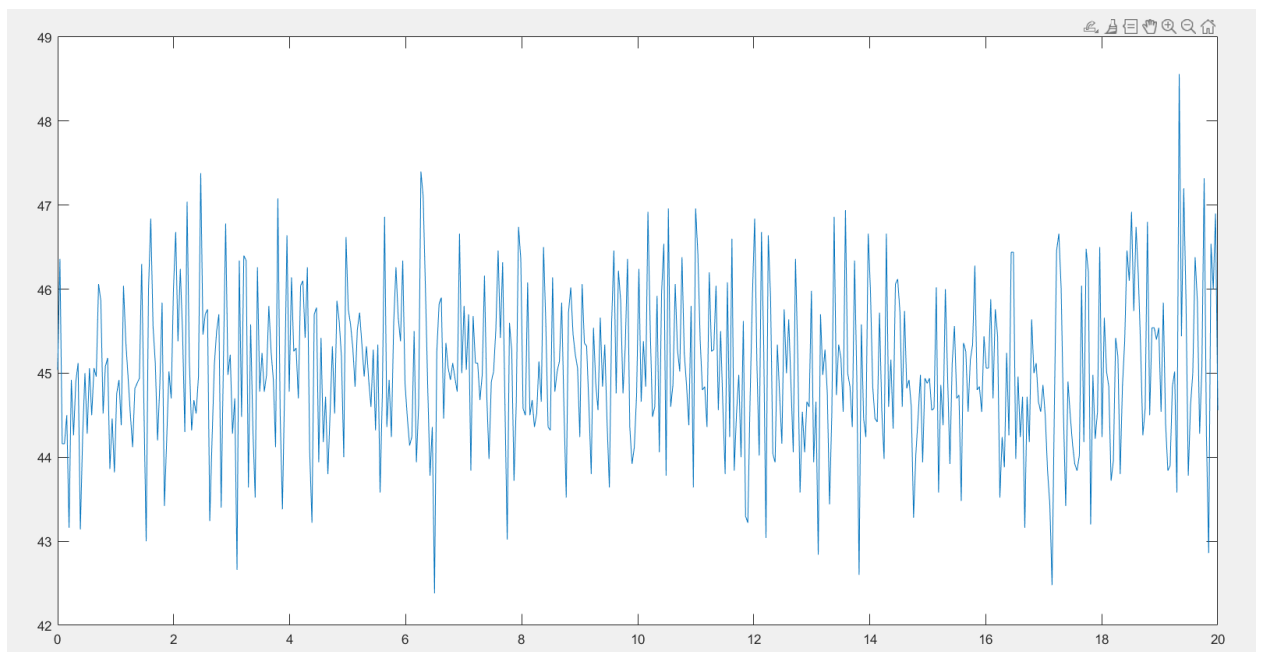


X₂

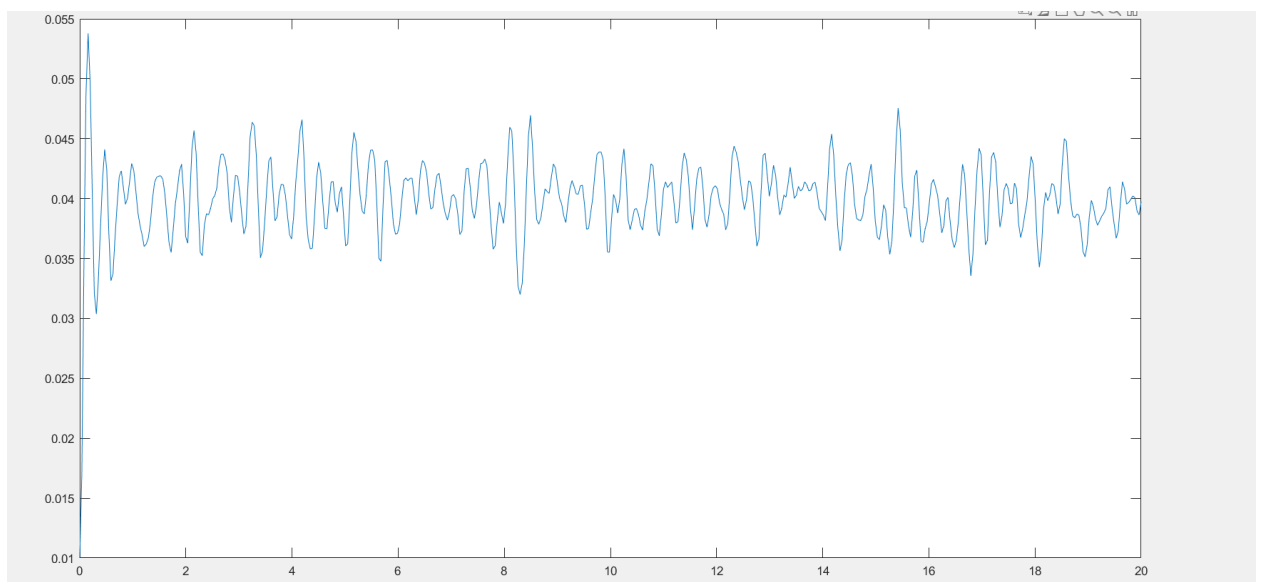


X₃

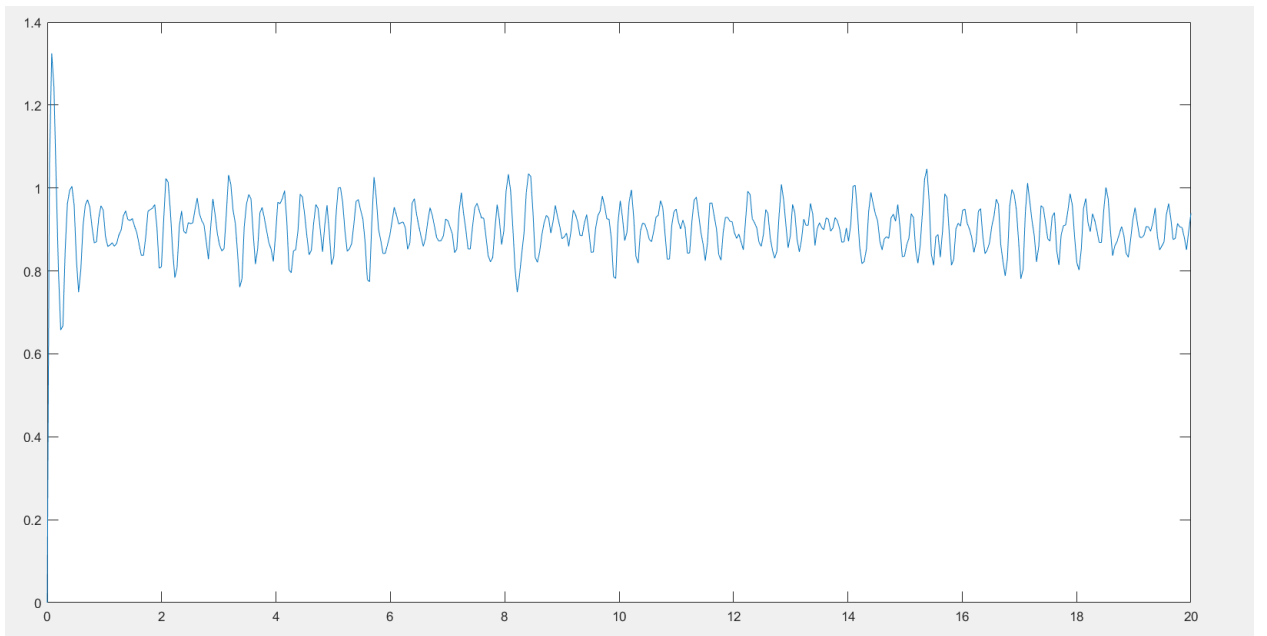
Среднее значение



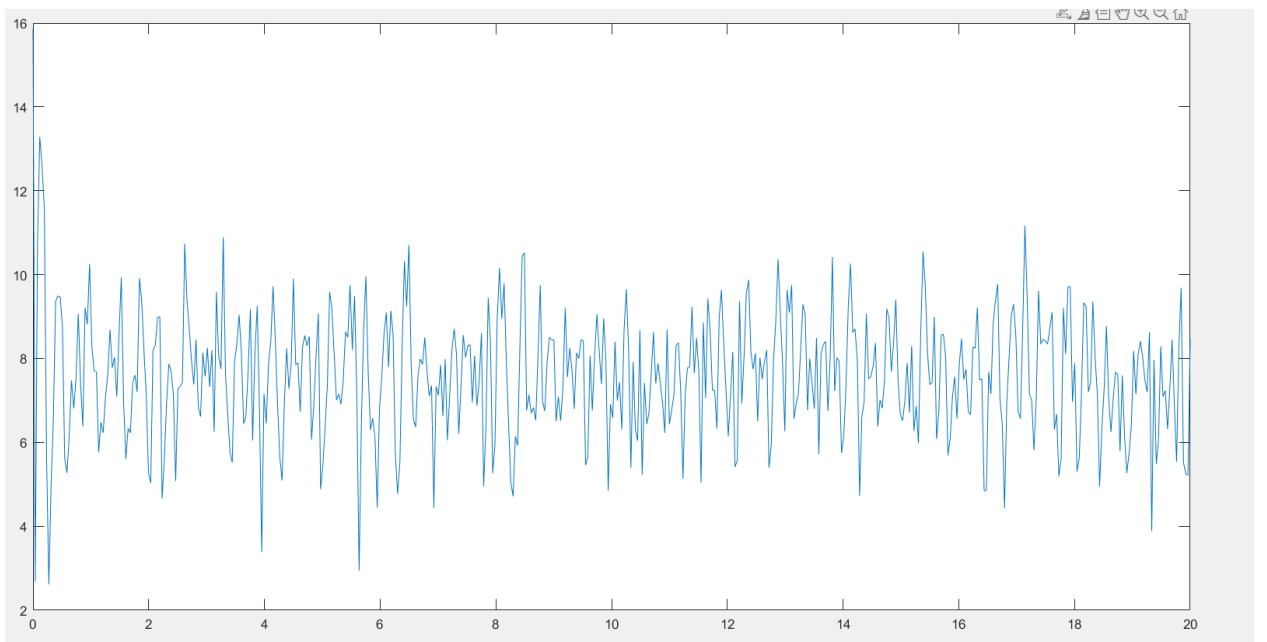
X_0



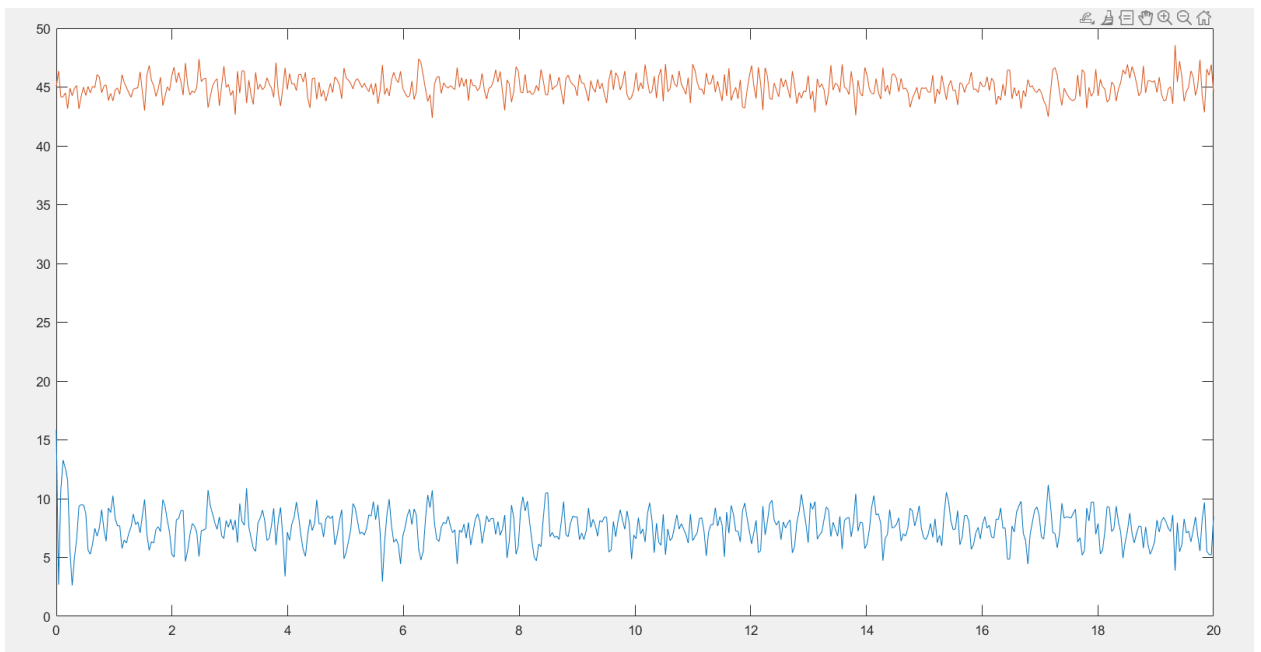
X_1



x_2

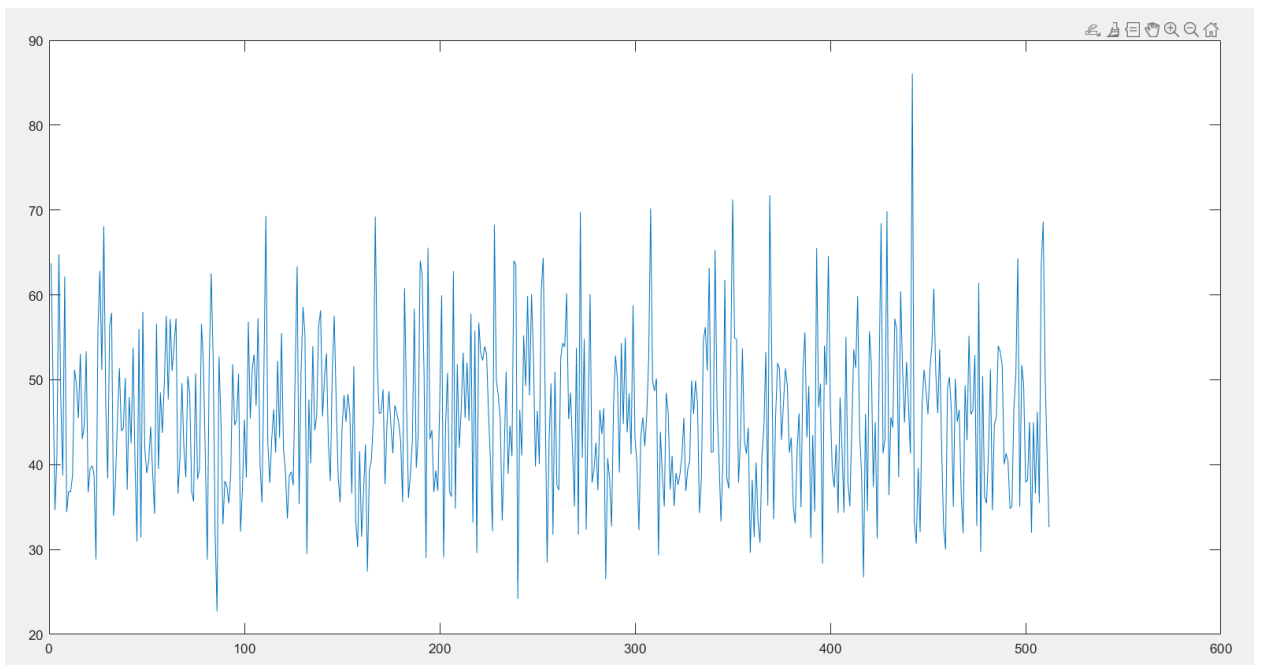


x_3

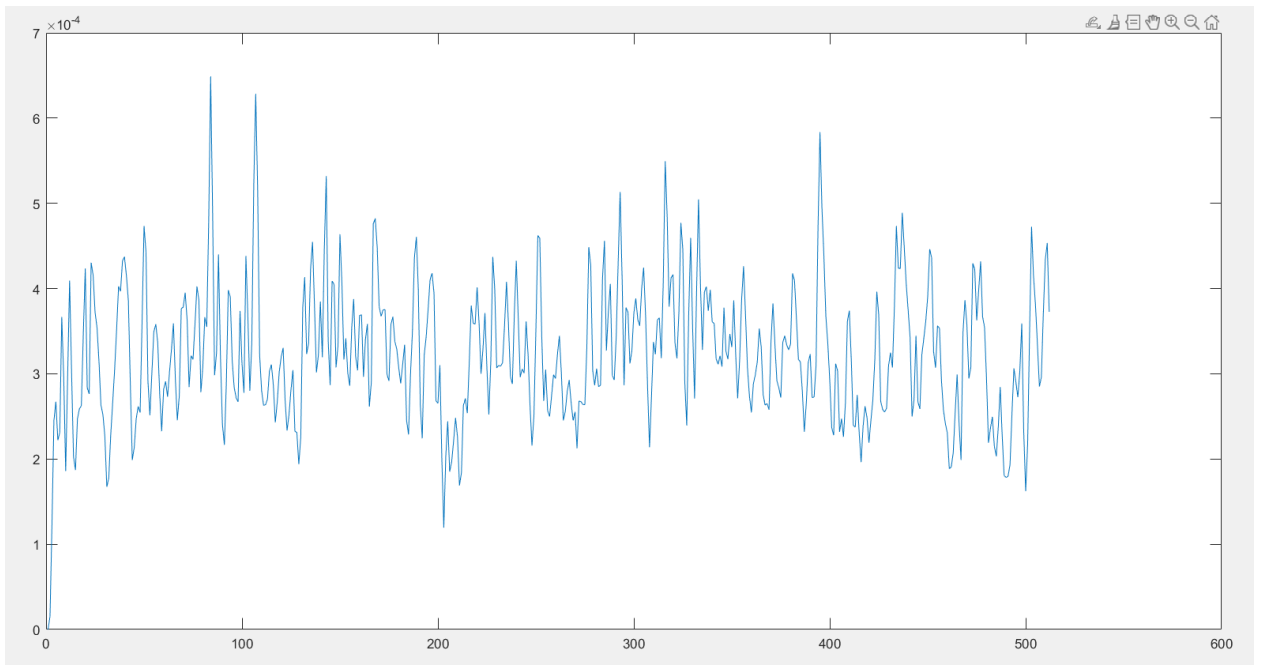


X_0 красный X_3 синий

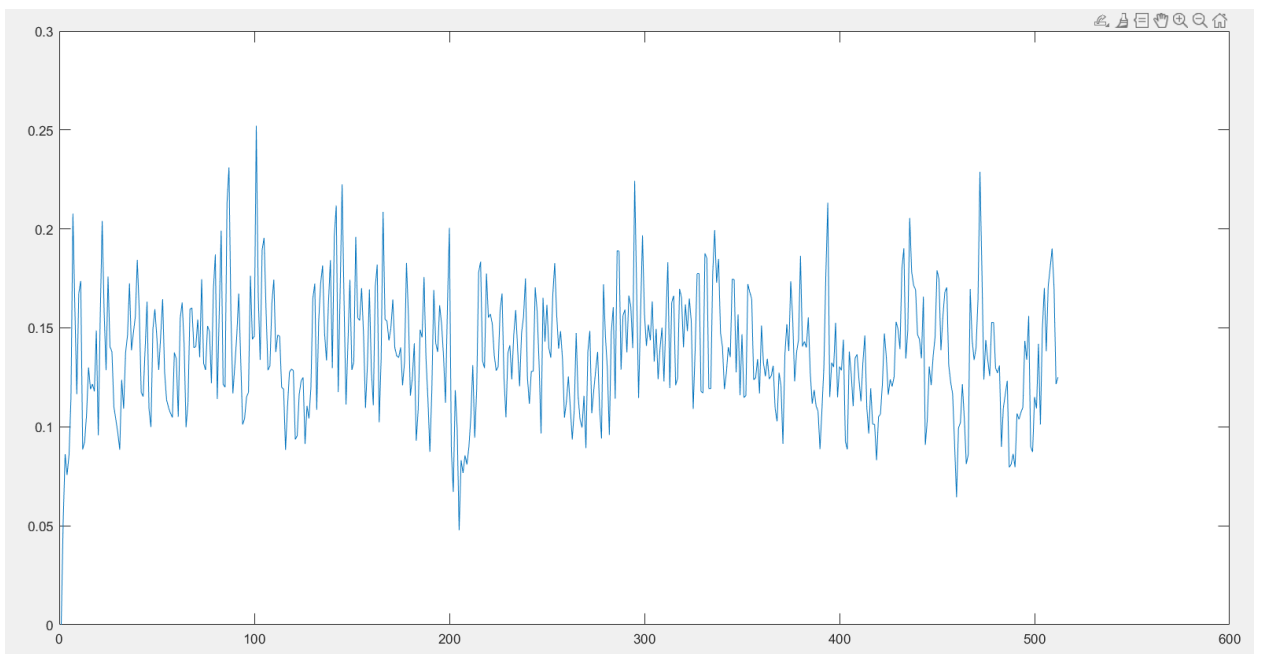
Дисперсия



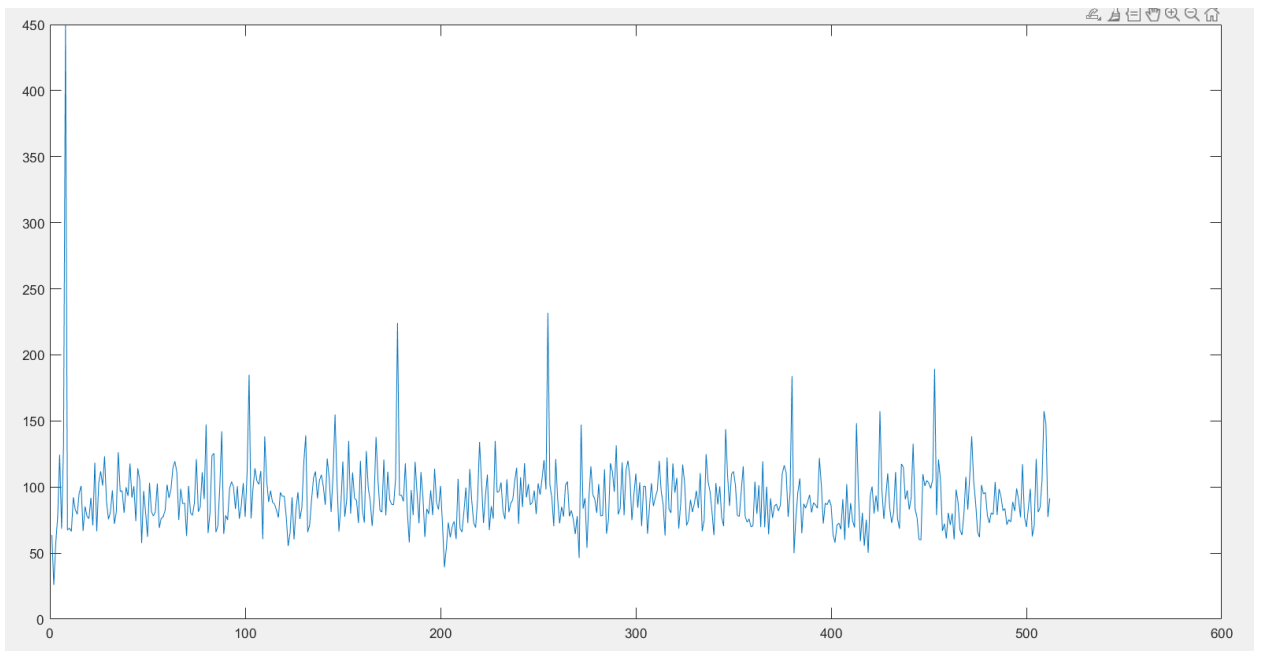
X_0



X_1

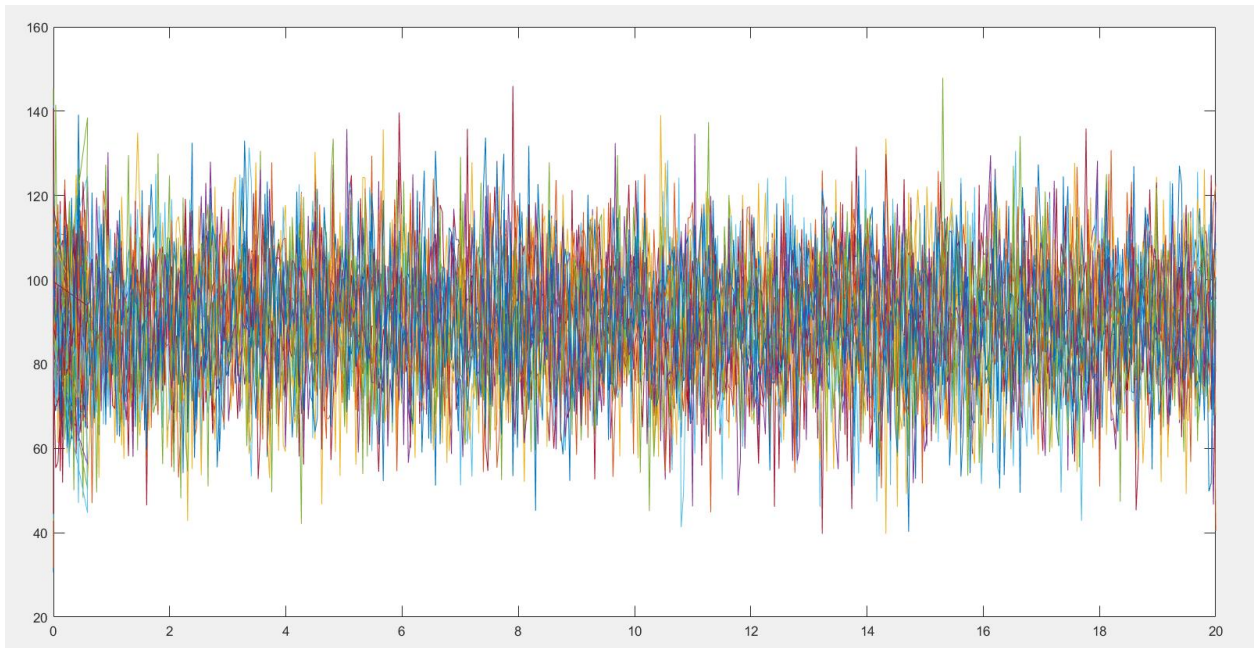


X_2

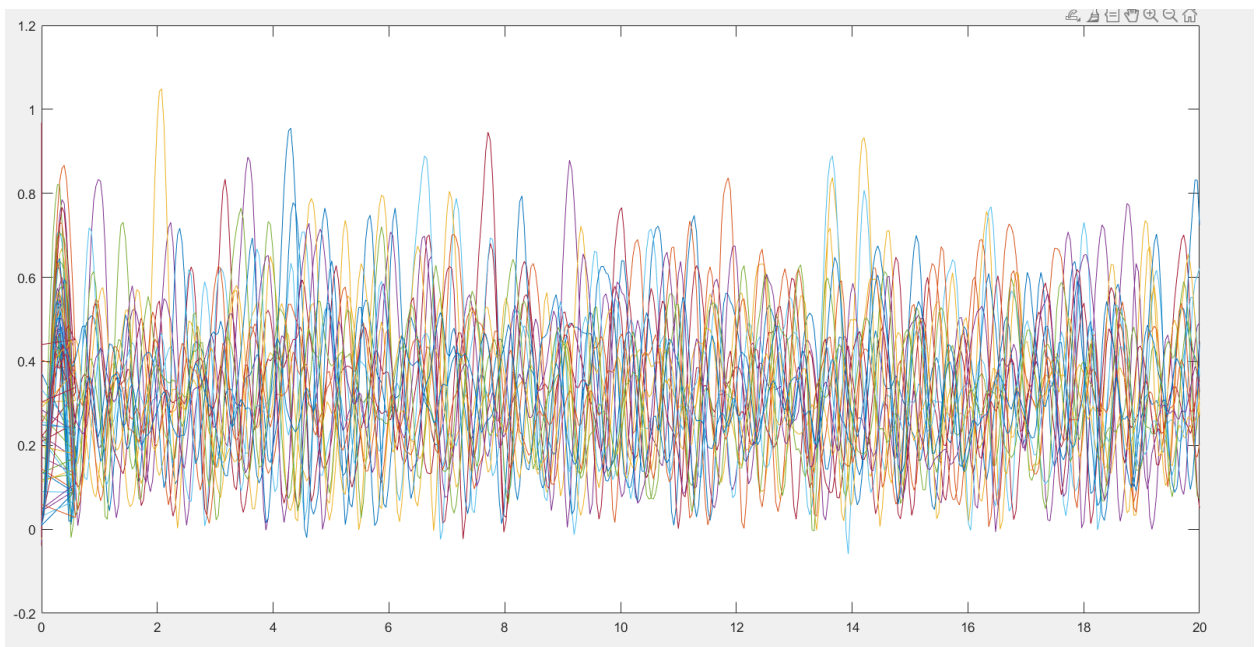


x_3

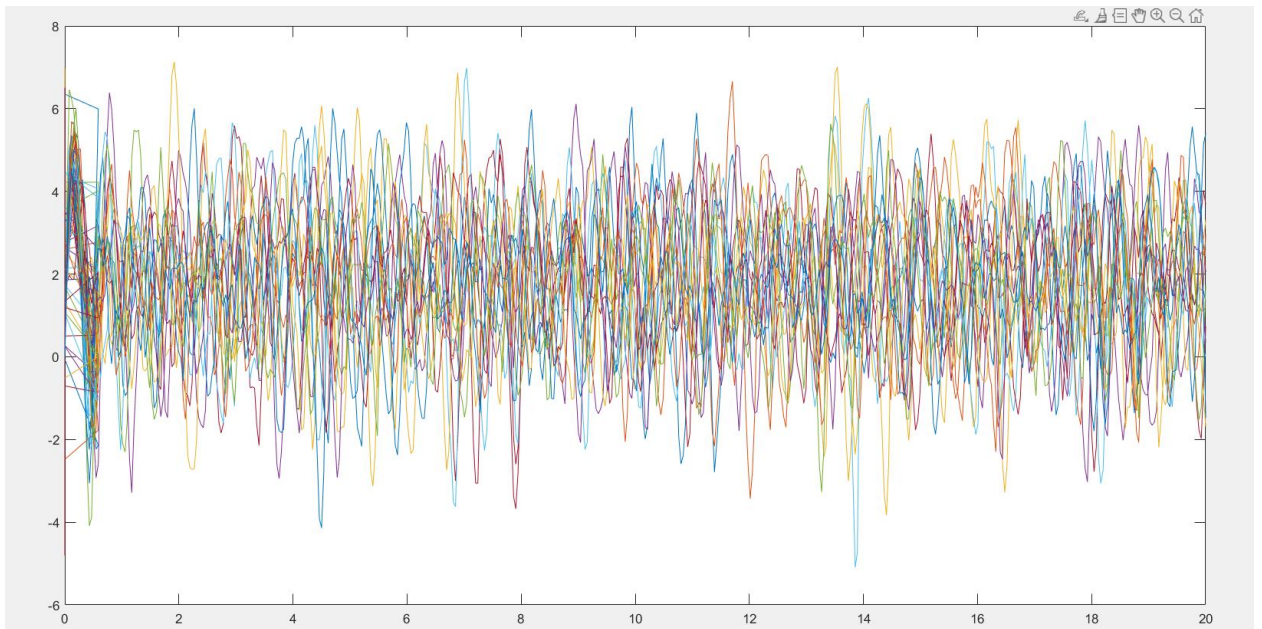
Предложения Б



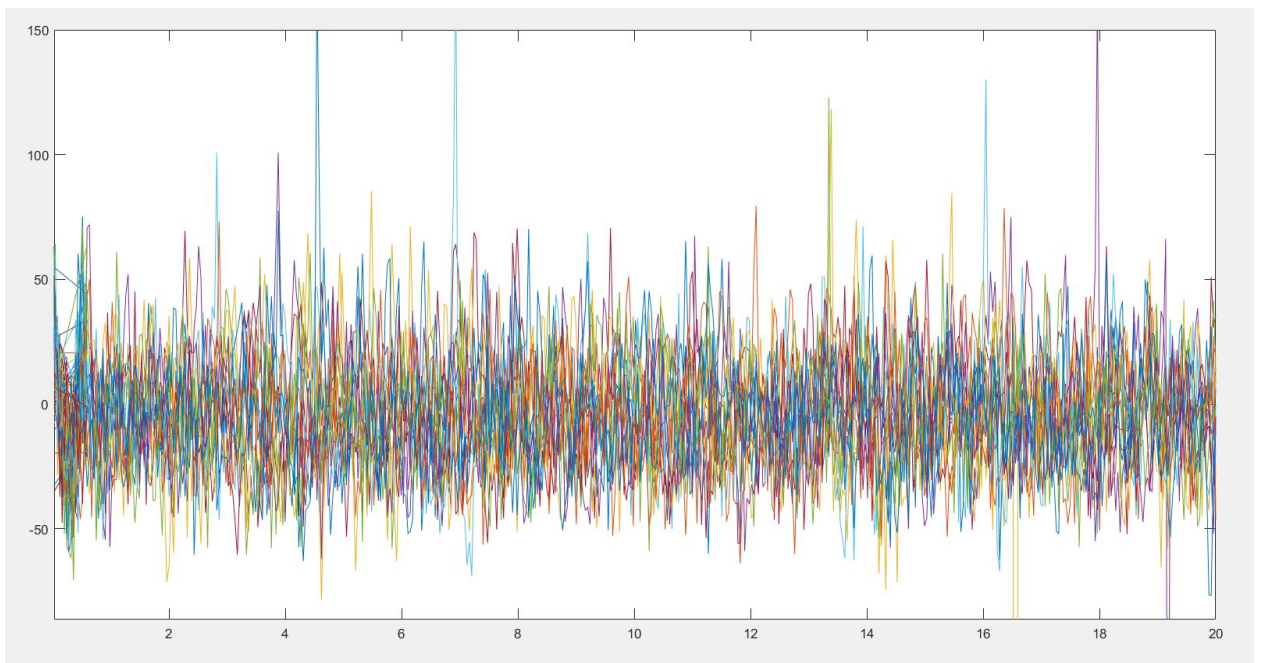
X_0



X_1

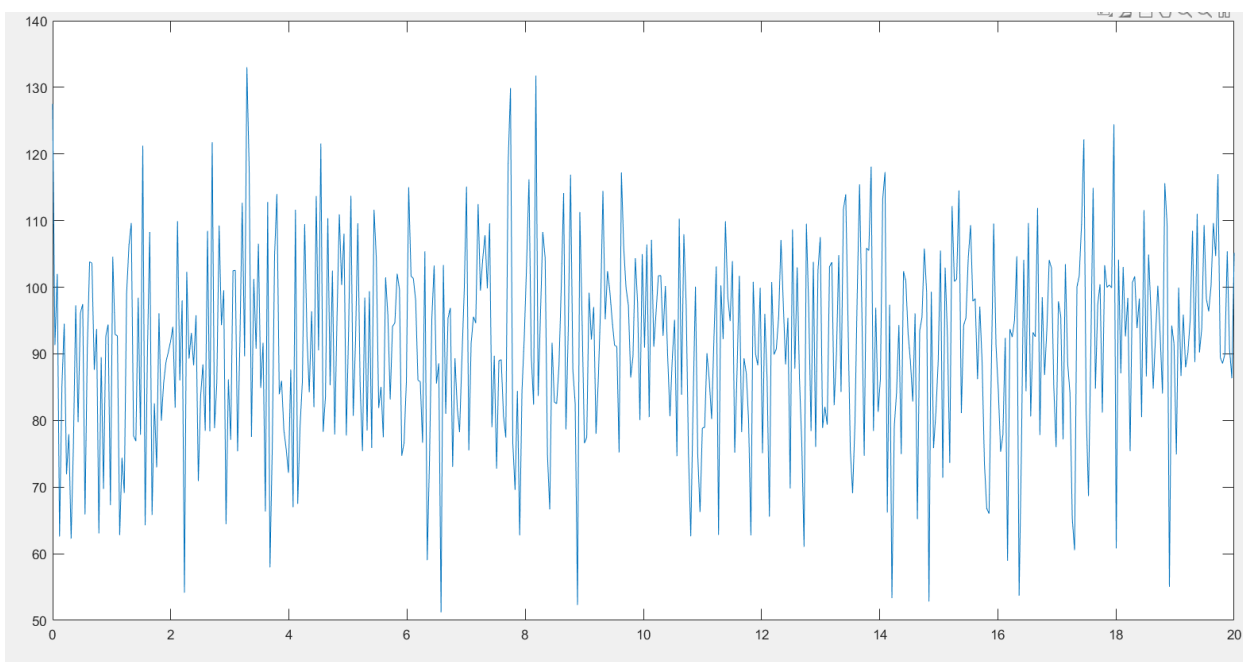


X₂

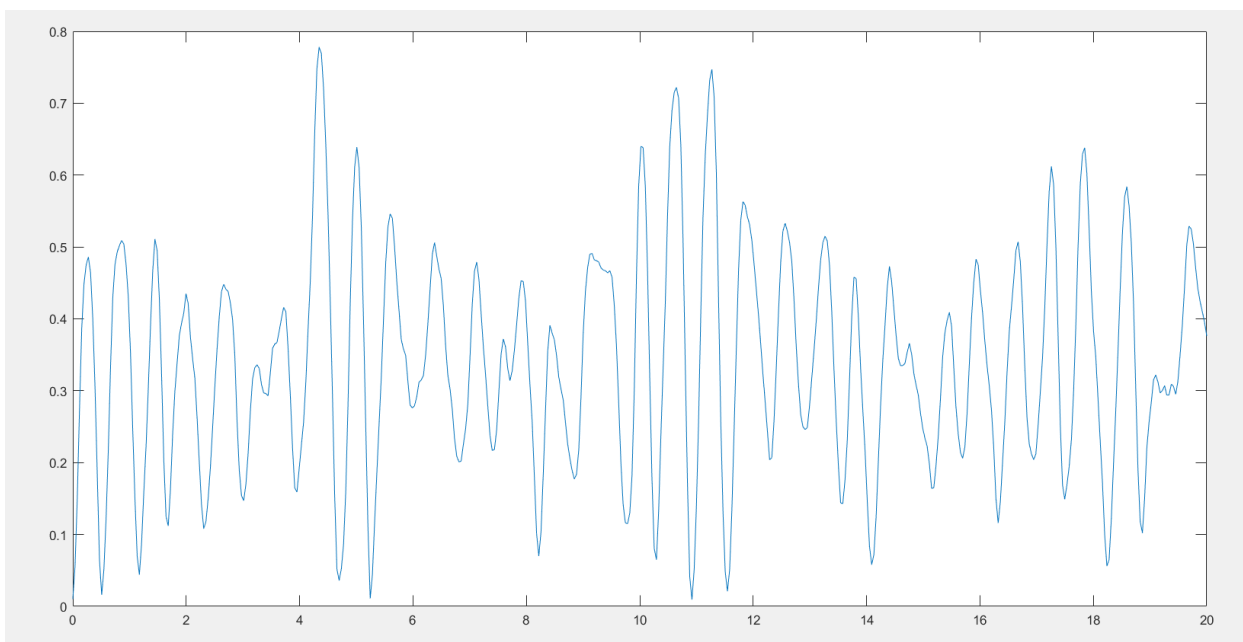


X₃

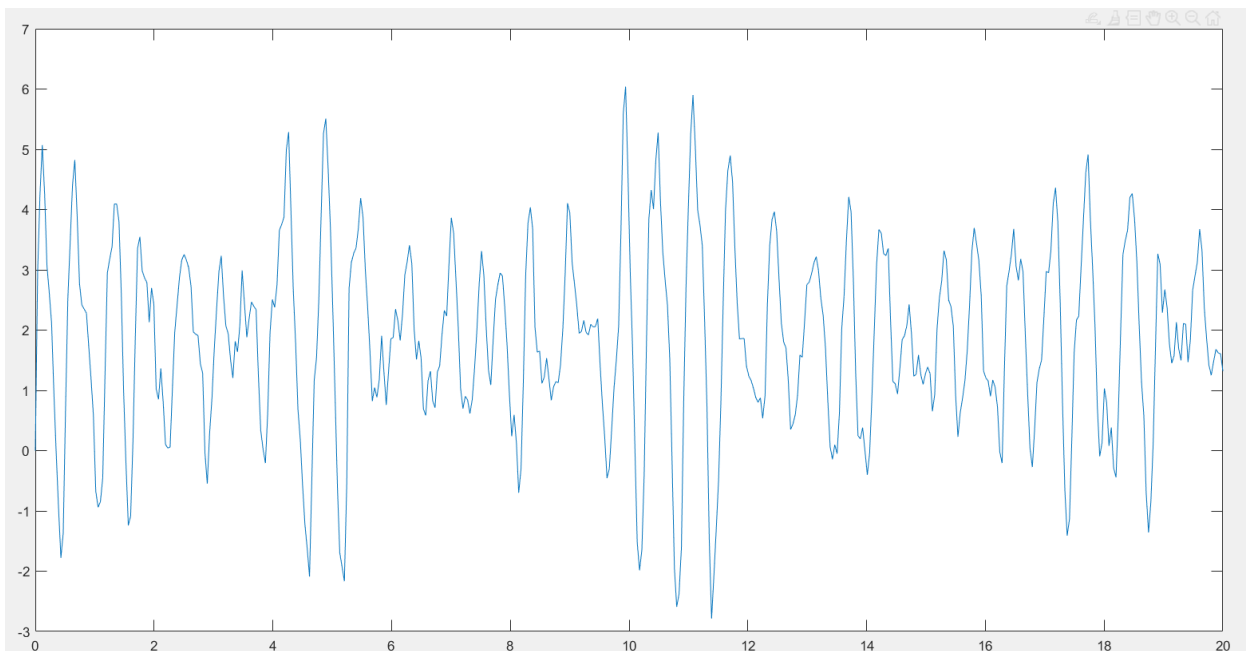
От за первое повторения



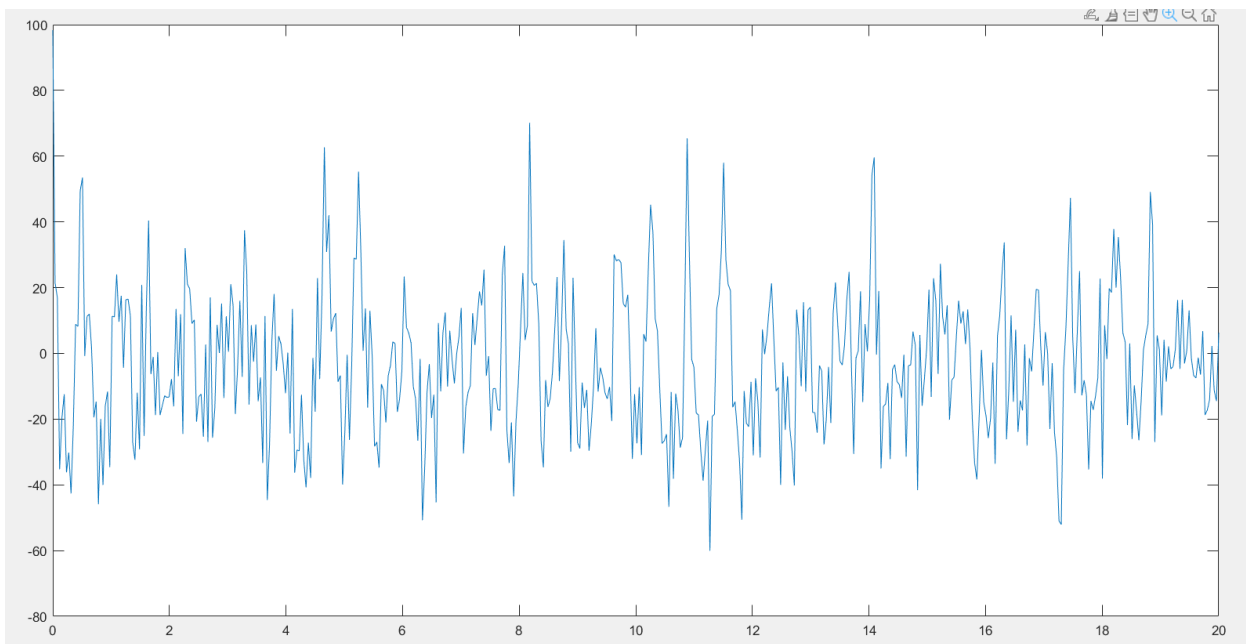
x_0



x_1

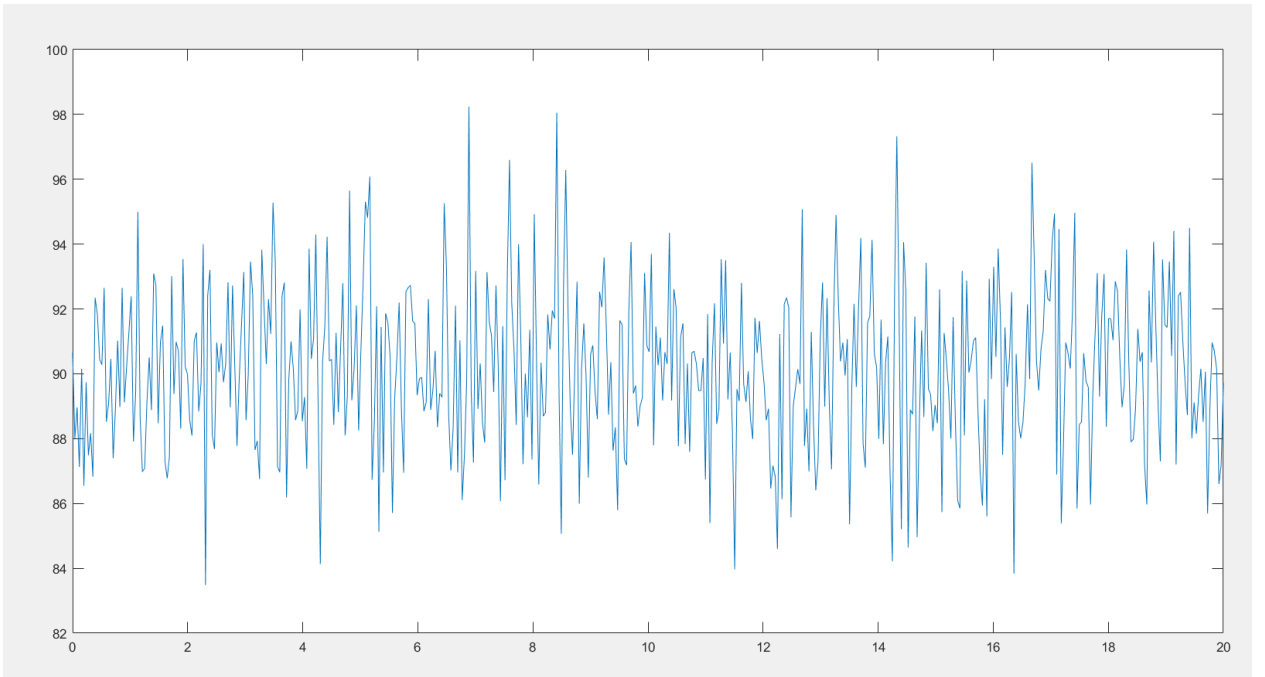


X₂

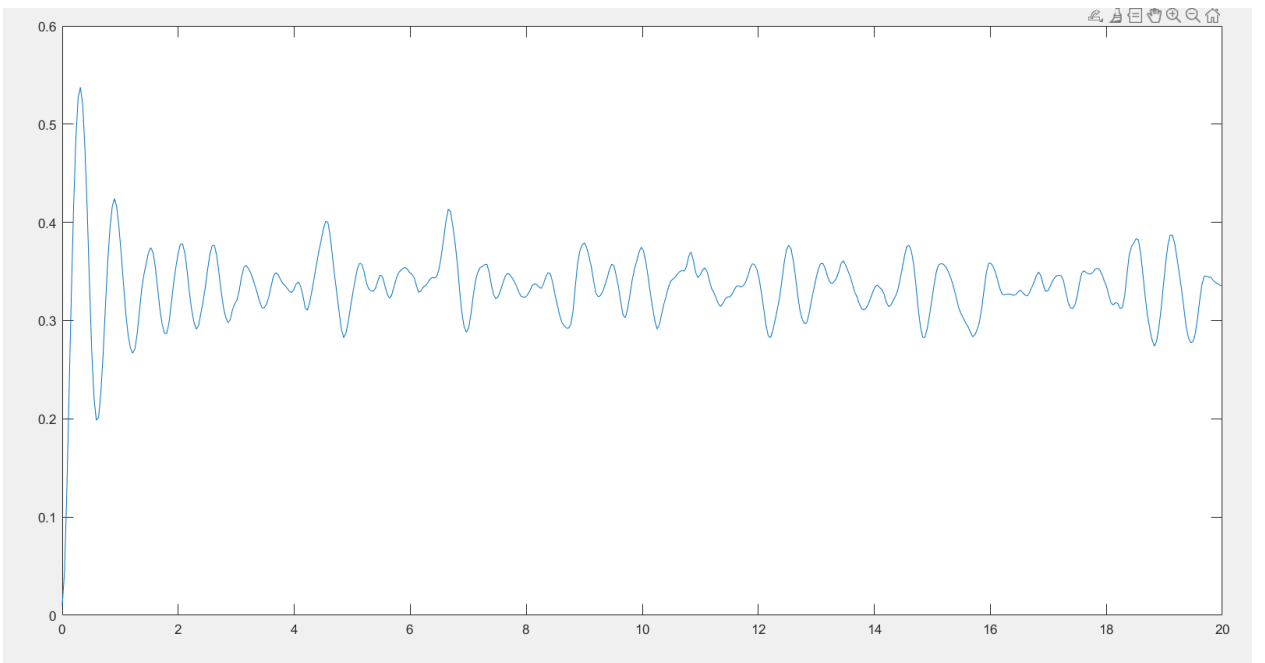


X₃

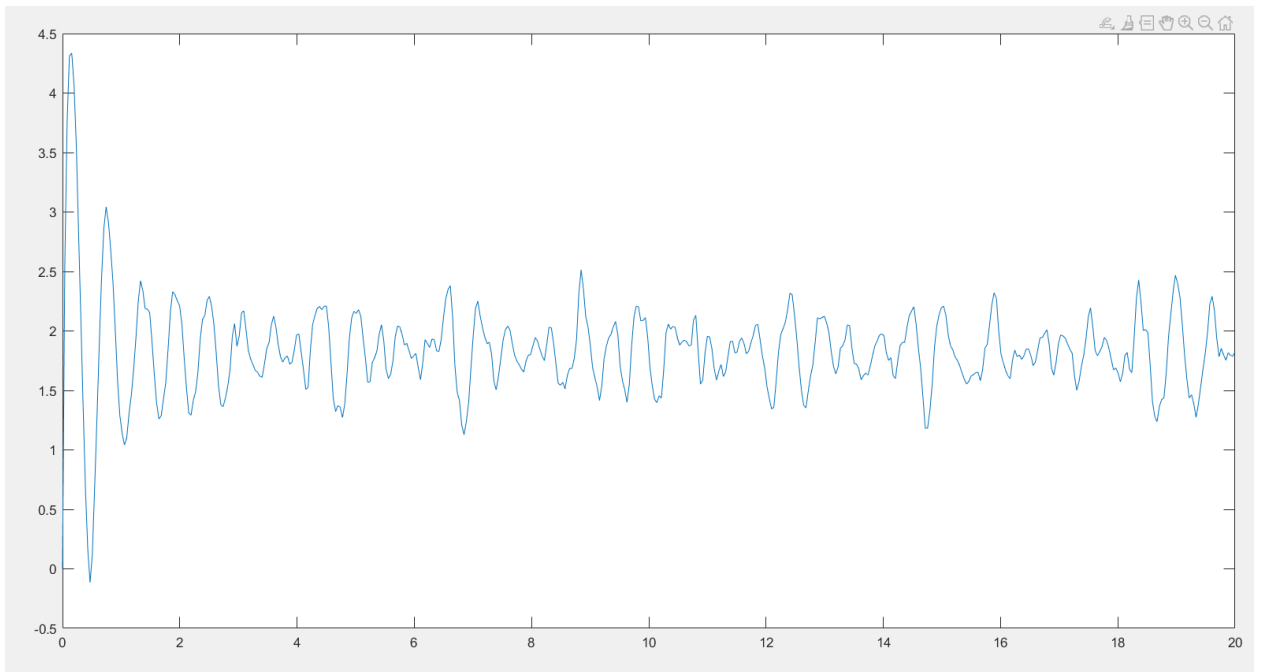
Среднее значение



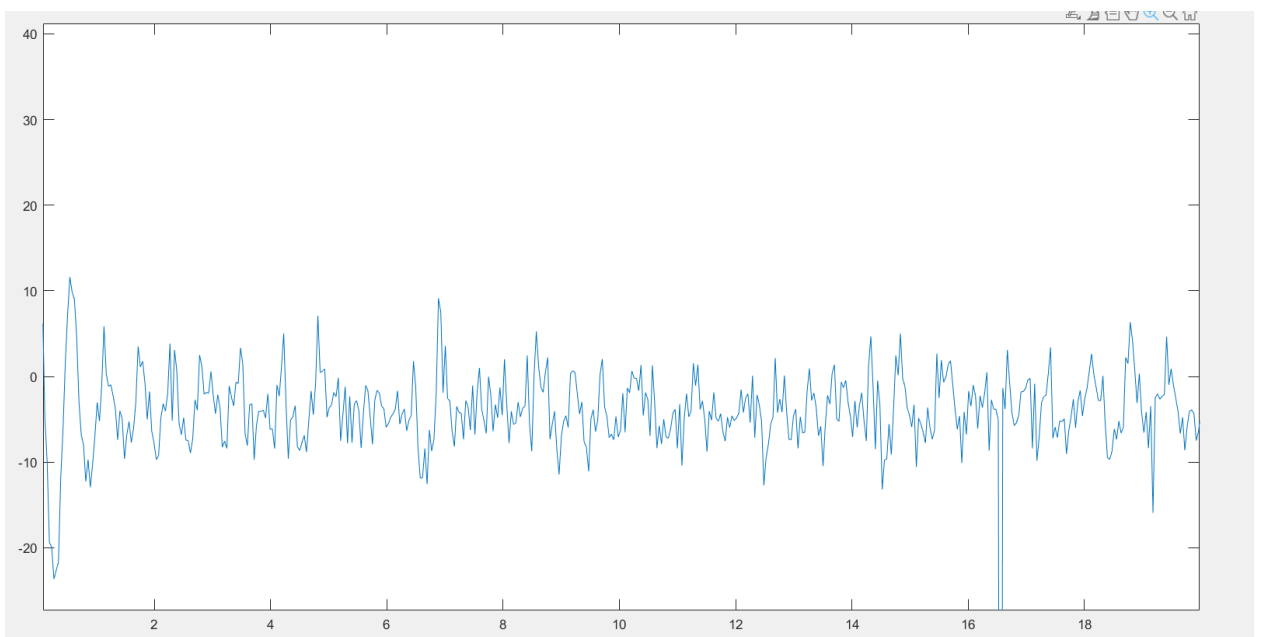
x_0



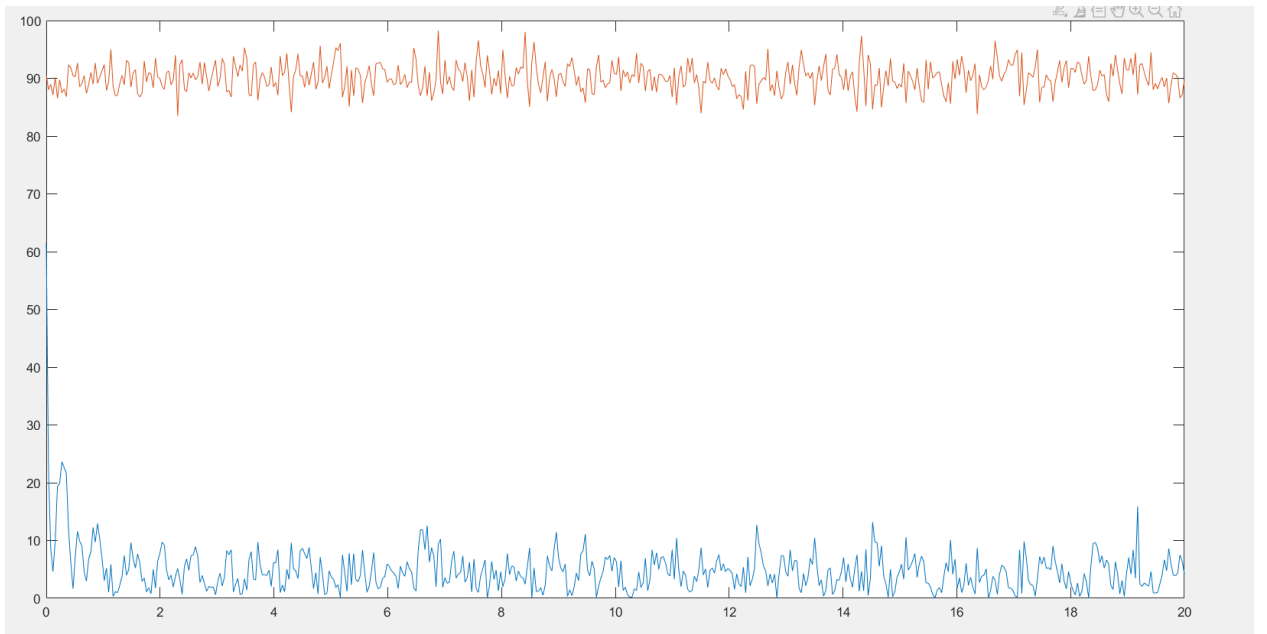
x_1



x_2



x_3



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлепбергенов Жумагали Уразгалиулы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Анализ надежности виброзащитных устройств на виброопорах качения

Научный руководитель: Еркебулан Тулешов

Коэффициент Подобия 1: 1.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 26

Знаки из других алфавитов: 9

Интервалы: 0

Белые Знаки: 11

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертацию
Тлепбергенов Ж.У.
по специальности 7М07107 – Робототехника и мехатроника
На тему: «Анализ надежности виброзащитных устройств на виброопорах качения»

Выполнено:

- а) графическая часть на __ листах
- б) пояснительная записка на __ страницах

Работа посвящена актуальной задаче исследования стохастических колебаний нелинейных виброзащитных систем на опорах качения с применением современных методов машинного обучения. Автор обосновал перспективность использования гибридного подхода, выполнил численное моделирование методом Монте-Карло, сформировал базу данных и разработал прогностическую модель на основе алгоритма Random Forest.

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения надежности сейсмоизоляции зданий и оборудования, а также сложностью расчета нелинейных систем традиционными методами. Автор обосновал необходимость внедрения алгоритмов искусственного интеллекта для ускорения инженерных расчетов, что делает работу значимой как в научном (новая методика анализа), так и в практическом (сокращение времени проектирования) аспекте.

Диссертация отличается новизной подхода, сочетает методы классической механики (нелинейная динамика, статистическая линеаризация) и технологии Data Science (Python, Scikit-learn), что имеет высокую практическую значимость для создания цифровых двойников механических систем.

Следует отметить комплексность подхода: работа включает вывод дифференциальных уравнений, генерацию синтетических данных, обучение нейросетевой модели и анализ важности признаков (Feature Importance). Автор продемонстрировал умение пользоваться специализированным программным обеспечением, интерпретировать результаты статистического моделирования, а также показал глубокое понимание физики процесса, выявив влияние геометрии опор на динамический отклик.

В целом работа выполнена на высоком уровне, демонстрирует научную зрелость автора, соответствует требованиям и заслуживает высокой оценки. Автор достоин присвоения академической степени магистра по специальности «Робототехника и мехатроника»).



Рецензент
К.т.н., ассоциированный профессор
_____ Сейдилдаева А.К.
(подпись)
«__» _____ 2026 г.

Ф КазННТУ 706-17. Рецензия

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ К.И.САТПАЕВА»

ОТЗЫВ
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
на магистерскую диссертацию

магистранту специальности 7М07107 — Робототехника и мехатроника

Глепберген Жумагали Уразгалиулы

Тема: «Исследование способов обработки сигнала для анализа электромиографических сигналов»

Данная работа посвящена анализу надежности виброзащитных устройств на виброопорах качения со спрямленными поверхностями с применением методов численного моделирования и машинного обучения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения сейсмостойкости сооружений в сейсмоопасных регионах и потребностью в разработке ускоренных методов оценки надежности нелинейных динамических систем при стохастических воздействиях.

В диссертации разработана математическая модель пространственного движения твердого тела на кинематических опорах, учитывающая геометрическую нелинейность и диссипативные свойства. Реализован алгоритм моделирования методом Монте-Карло для формирования репрезентативной выборки данных. Проведено сравнительное исследование алгоритмов машинного обучения, в ходе которого обоснована эффективность применения метода Random Forest для построения суррогатной модели системы, обеспечивающей высокую точность прогнозирования динамического отклика при существенном сокращении времени вычислений.

Работа выполнена на высоком научно-методическом уровне, отличается логичностью изложения, обоснованностью применения методов стохастического анализа и искусственного интеллекта. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы при проектировании систем сейсмоизоляции и цифровых двойников строительных конструкций.

Диссертационная работа по своему содержанию, уровню выполнения и качеству оформления соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, в связи с чем заслуживает оценки «отлично», а автор может быть рекомендован к защите диссертации.

Научный руководитель
К.т.н, ассоциированный профессор,



Тулешов Е. А.

«__» __20__ г.