

Расчет и конструирование Calculation and design

Научная статья
УДК 62-97/-98
DOI: 10.14529/engin240401

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНИ-ПОГРУЗЧИКА «TERMIT 1000»: КРЕСЛО ОПЕРАТОРА

Ю.А. Авдалов¹, Avdalov_yua@kzdm.ru

Р.А. Закиров², zakirovra@susu.ru

С.В. Алюков², alysergey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1294-7958>

Н.Ю. Варкова², varkovani@susu.ru

¹ Курганский завод дорожных машин «Кургандормаш», Курган, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Важными характеристиками рабочего процесса мини-погрузчика являются параметры вибрации. Повышенные уровни вибрации приводят к стрессовому характеру условий работы водителя-оператора, а в некоторых случаях являются причиной хронических профессиональных заболеваний. Поэтому исследования вибрационных характеристик, несомненно, являются важным аспектом совершенствования мини-погрузчиков, улучшения их эксплуатационных показателей. В работе мини-погрузчиков выделяют три основных режима: работа на холостом ходу двигателя, режим движения погрузчика и подъем груза. Значительная доля вибрации приходится на оператора при движении погрузчика. Поэтому в данной работе рассматривался только режим движения. Так как в реальности погрузчик работает на всех трех режимах, общий уровень вибрационного воздействия на оператора будет менее значительным. Заметим, что результаты измерений вибрационных характеристик погрузчика могут отличаться при замене сидения оператора на другое или, например, при изменении типа применяемых шин. Проведенные экспериментальные исследования могут помочь в проведении сравнительного анализа вибрационного анализа для погрузчиков с различными типами сидений, шин и другими особенностями. Предметом исследований являются вибрационные воздействия на оператора со стороны кресла, так как именно эти воздействия являются определяющими для осуществления комфортных условий работы оператора. В статье используются различные методы статистической обработки информации: описательные статистики, методы корреляционного анализа, множественной регрессии, кластерный анализ, факторный анализ, многомерное шкалирование и другие. Разнообразие примененных методов позволило детально описать вибрационные характеристики, дать практические рекомендации, направленные на выявление вибрационных особенностей условий работы оператора мини-погрузчика, рекомендации по снижению вибрационных воздействий. Полученные результаты планируется применить при совершенствовании конструкций мини-погрузчика для улучшения его технико-эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: погрузчик, экспериментальные исследования, вибрационные характеристики, статистический анализ, кресло оператора

Для цитирования: Статистический анализ результатов экспериментальных исследований мини-погрузчика «Termit 1000»: кресло оператора / Ю.А. Авдалов, Р.А. Закиров, С.В. Алюков, Н.Ю. Варкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 4. С. 5–21. DOI: 10.14529/engin240401

STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MINI-LOADER “TERMIT 1000”: OPERATOR'S SEAT

Yu.A. Avdalov¹, Avdalov_yua@kzdm.ru

R.A. Zakirov², zakirovra@susu.ru

S.V. Aliukov², alysergey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1294-7958>

N.Yu. Varkova², varkovani@susu.ru

¹ Kurgan Plant of Road Machines “Kurgandormash”, Kurgan, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Important characteristics of the mini-loader operating process are vibration parameters. Increased vibration levels lead to stressful working conditions for the driver-operator, and in some cases are the cause of chronic occupational diseases. Therefore, studies of vibration characteristics are undoubtedly an important aspect of improving mini-loaders and enhancing their performance. There are three main modes of operation of mini-loaders: engine idle, loader movement mode, and load lifting. A significant share of vibration falls on the operator when the loader is moving. Therefore, in this paper, only the movement mode was considered. Since in reality the loader operates in all three modes, the overall level of vibration impact on the operator will be less significant. Note that the results of measuring the vibration characteristics of the loader may differ when replacing the operator's seat with another one or, for example, when changing the type of tires used. The experimental studies can help in conducting a comparative analysis of vibration analysis for loaders with different types of seats, tires, and other features. The subject of the research is vibration effects on the operator from the chair, since these effects are decisive for the implementation of comfortable working conditions for the operator. The article uses various methods of statistical processing of information: descriptive statistics, methods of correlation analysis, multiple regression, cluster analysis, factor analysis, multidimensional scaling and others. The variety of methods used allowed us to describe in detail the vibration characteristics, give practical recommendations aimed at identifying the vibration features of the working conditions of the mini-loader operator, recommendations for reducing vibration effects. The obtained results are planned to be used in improving the designs of the mini-loader to improve its technical and operational characteristics.

Keywords: loader, experimental studies, vibration characteristics, statistical analysis, operator's seat

For citation: Avdalov Yu.A., Zakirov R.A., Aliukov S.V. Varkova N.Yu. Statistical analysis of the results of experimental studies of the mini-loader “Termit 1000”: operator's seat. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024:24(4):5–21. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240401

Введение

Цель и актуальность исследования. Проведенные многочисленные исследования неопровержимо указывают на негативное влияние вибраций на человека, что проявляется в значительном увеличении мышечных нагрузок вплоть до вибрационной болезни, нарушении комфортных условий работы оператора, резком усилении уровня шума и других отрицательных последствиях. Достаточно сказать, что вибрационная болезнь стоит на втором месте среди всех профессиональных заболеваний. Наиболее часто этой болезни подвержены водители транспортных средств, операторы специальных машин и агрегатов [1]. Так, например, в странах Евросоюза болезни, связанные с нарушением работы опорно-двигательной системы, составляют примерно половину всех болезней, вызванных неблагоприятными рабочими условиями [2]. Поэтому снижение вибрации в технологических машинах и оборудовании, несомненно, является важной проблемой. **Целью данного исследования** является статистический анализ характеристик вибрационных воздействий на оператора мини-погрузчика «Termit 1000» со стороны кресла в процессе работы погрузчика, выявление возможностей снижения этих воздействий. Исходя из вышесказанного,

актуальность исследования не вызывает сомнений и обусловлена поиском решений по снижению негативных вибрационных влияний на оператора.

Обзор литературы. В настоящее время имеется большое количество научных публикаций, посвященных многообразным аспектам вибрационных проявлений. Можно отметить фундаментальный труд в 6 томах [3], предназначенный для инженерно-технических работников, выполняющих расчеты при проектировании и изготовлении машин, механизмов и технических систем различного назначения. В статье [4] проводится анализ различных методов защиты технических систем от вибрации. Приводится подробная классификация методов защиты. Статья [5] базируется на четырех главных разделах: демпфирование колебаний, виброизоляция, динамическое гашение колебаний, снижение виброактивности источников колебаний. Актуальной задачей [6] является создание прибора виброанализа, в состав которого входит датчик для измерения вибрации, принцип работы которого основан на использовании прямого пьезоэффекта. В работе [7] исследуются вибрации в мини-погрузчике, предлагается математическая модель мини-погрузчика и проводится сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами. Объектом изучения в статье [8] является сельскохозяйственный фронтальный погрузчик, предназначенный для погрузки и транспортировки различных сельскохозяйственных материалов, включая почву. Поскольку погрузчик подвергается различным нагрузкам из-за рабочей среды, требуется анализ его безопасности с учетом вибрации в различных фактических условиях работы. В ходе исследования [9] измерялось воздействие вибрации на тело оператора фронтального погрузчика. Были выявлены типы шин, существенно снижающих воздействие на операторов фронтальных погрузчиков и позволяющих снизить износ транспортного средства, связанный с вибрацией. Результаты исследований для оценки воздействия вибрации, которому подвергаются операторы компактных колесных погрузчиков, в соответствии с ISO 2631-1:1997 представлены в статье [10].

Постановка проблемы и формулирование гипотезы. Общая цель исследований вибрационных процессов мини-погрузчика, направленных на поиск основных причинно-следственных связей, заключается в повышении эффективности работы погрузчика, безопасности и комфортабельности условий труда оператора-водителя. Отмеченная цель реализуется в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации погрузчика с помощью применения методов и приемов виброзащиты, использования средств вибрационной диагностики технического состояния погрузчика. Основными задачами исследования являются: определение стадий работы погрузчика, активно влияющих на вибрацию со стороны кресла погрузчика на оператора, степени влияния этих стадий и этапов работы погрузчика на характеристики вибрационных процессов.

Методология исследования. Для проведения анализа вибрационных экспериментальных данных широко применялись статистические методы обработки информации [11], начиная от методов описательной статистики и заканчивая самыми современными методиками и технологиями с использованием методов многомерного шкалирования, кластерного и факторного анализа. Обработка информации проводилась с помощью компьютерной программы SPSS, признанной одной из наиболее эффективных в области анализа статистических многомерных данных.

Структура работы. Основными разделами статьи являются: **введение** с подразделами: цель и актуальность исследования, обзор литературы, постановка проблемы и формулирование гипотезы, методология исследования, структура работы; **материалы и методы** с подразделами: краткое описание погрузчика, методика проведения экспериментальных исследований, описательные статистики, корреляционный анализ, множественный регрессионный анализ, кластерный анализ, многомерное шкалирование, факторный анализ; **результаты и обсуждения; список литературы.**

Материалы и методы

Краткое описание погрузчика

Мини-погрузчик «Termit 1000» предназначен для планировки участков местности, погрузки и перемещения грунта или сыпучих материалов, на транспортно-складских работах со штучными грузами, рытья траншей, бурения скважин, уборки территорий от снега и мусора и других работ с помощью соответствующего сменного оборудования. Фотография погрузчика изображена на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид мини-погрузчика «Termit 1000»
Fig. 1. General view of the “Termit 1000” mini-loader

Достаточно простая конструкция, удобство в управлении являются положительными особенностями погрузчика, что приводит к простоте в эксплуатации, при этом погрузчик не требует сложного технического обслуживания. Все появляющиеся неисправности быстро исправляются, что способствует минимальному времени простоя и высокой производительности труда на месте работы. Основные технические характеристики мини-погрузчика представлены в табл. 1.

Основные технические характеристики

Таблица 1

Main technical characteristics

Table 1

Технические характеристики	Значения
Грузоподъемность	1 000 кг
Высота подъема стрелы	3,1 м
Система управления	Джойстиком с электрогидравлическим приводом с раздельным управлением хода и управлением рабочими органами
Эксплуатационная масса	3170 кг
Опрокидывающая нагрузка	2000 кг
Скорость	12 км/ч
Тип двигателя	Дизельный, 4-цилиндровый, с непосредственным впрыском топлива
Мощность двигателя	65,4 л. с.
Тип охлаждения двигателя	Жидкостное
Система поворота	За счёт разности скоростей движения колес правого и левого бортов

На рис. 2 представлена фотография кресла, установленного в кабине погрузчика. Кресло оператора подпрессорное, регулируется в двух плоскостях, оснащено датчиком безопасности присутствия оператора.

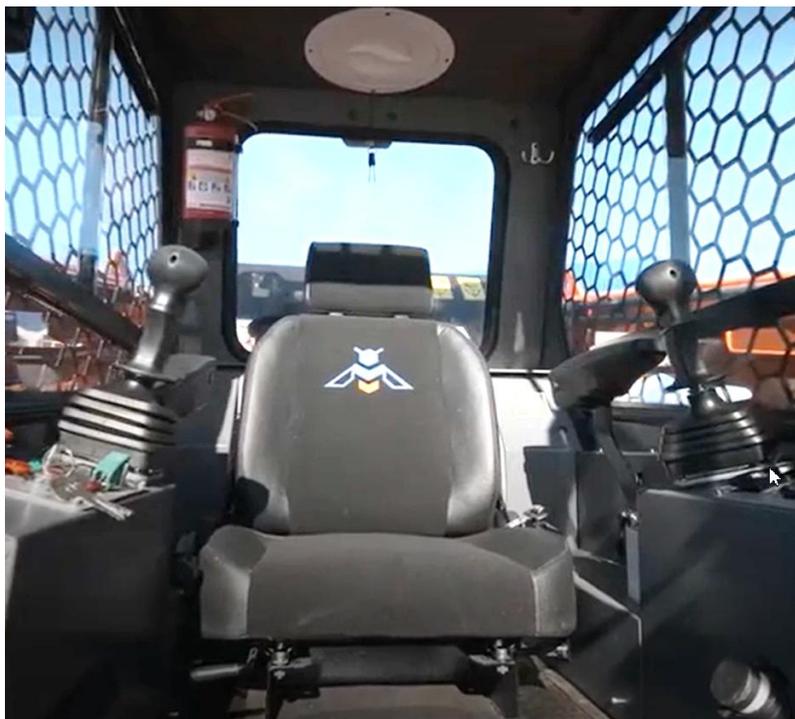


Рис. 2. Кресло оператора
Fig. 2. Operator's chair

Методика проведения экспериментальных исследований.

Исходные данные

Погрузчик, на котором проводились измерения, был представлен в полной комплектации. Условия испытаний были выбраны близкими к условиям реальной эксплуатации погрузчика.

Вибрационный датчик был размещён на поверхности сиденья с помощью полужесткого диска с выполнением требований ГОСТ Р 53080-2008 (ЕН 13059:2002), устанавливающего правила измерения вибрационной характеристики машин напольного транспорта. ГОСТ является модифицированным по отношению к европейскому стандарту ЕН 13059:2002 «Безопасность напольного транспорта. Методы испытаний с целью измерений параметров вибрации» (EN 13059:2002 “Safety of industrial trucks – Test methods for measuring vibration”).

Схема установки датчика (Д) показана на рис. 3.

Для погрузчика характерны три режима работы: движение самой машины, подъем груза и работа на холостом ходу двигателя. При этом достаточно большой уровень вибрации по воздействию на оператора соответствует только режиму движения погрузчика. Поэтому согласно ГОСТ 31193 испытательный код по вибрации для погрузчика включал только режим движения.

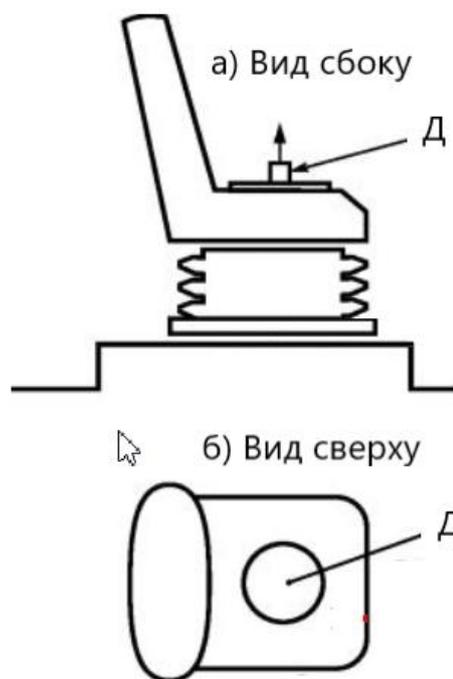


Рис. 3. Точка и направление измерений общей вибрации
Fig. 3. Point and direction of general vibration measurements

Таблица 2

Исходные данные

Table 2

Initial data

Кресло								
Канал 3	переполнения нет	коэфф. калибровки: -0,21						
Вибрация (октавы)								
	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00	125,00
1 сек скз	2,23E-04	5,91E-04	5,44E-04	1,74E-03	1,74E-02	8,29E-02	1,60E-02	2,22E-03
1 сек мин	3,13E-05	6,73E-05	1,04E-04	6,06E-04	3,80E-03	8,57E-03	9,47E-03	1,99E-03
1 сек макс	3,32E+01	2,95E+01	2,24E-02	4,34E-02	6,14E-02	1,23E-01	8,04E-02	1,74E-02
5 сек скз	1,81E-04	1,11E-03	6,62E-04	2,05E-03	1,60E-02	8,57E-02	1,56E-02	2,92E-03
5 сек мин	2,58E-05	1,09E-04	1,88E-04	7,77E-04	4,08E-03	9,39E-03	1,11E-02	2,27E-03
5 сек макс	2,13E+01	1,53E+01	2,24E-01	2,55E-02	3,58E-02	1,22E-01	4,28E-02	1,68E-02
10 сек скз	1,48E-04	8,70E-04	8,10E-04	2,36E-03	1,57E-02	8,59E-02	1,38E-02	2,67E-03
10 сек мин	1,83E-05	1,20E-04	2,13E-04	8,31E-04	4,30E-03	1,01E-02	1,16E-02	2,29E-03
10 сек макс	1,53E+01	1,08E+01	7,66E+00	2,16E-02	3,08E-02	1,21E-01	4,19E-02	1,64E-02
Лэкв	3,84E+00	2,72E+00	1,92E+00	1,36E+00	9,56E-01	7,48E-02	2,68E-02	8,95E-03

Описательные статистики

Меры средней тенденции, меры разброса, меры формы

По результатам проведения испытаний были получены значения основных описательных статистик (табл. 3), включающих меры средней тенденции (среднее арифметическое, медиана, мода), меры разброса (размах, межквартильный размах, дисперсия, среднеквадратическое отклонение) и меры формы (асимметрия, эксцесс).

Для удобства применения компьютерной программы и интерпретации полученных результатов переобозначим переменные:

1,00 = VAR1, 2,00 = VAR2, 4,00 = VAR4, 8,00 = VAR8, 16,00 = VAR16, 31,50 = VAR31_5, 63,00 = VAR63, 125,00 = VAR125

Таблица 3

Описательные статистики

Table 3

Descriptive statistics

Названия характеристик		Статистика	Названия характеристик		Статистика
VAR1	Среднее	7,36406270	VAR2	Среднее	5,83228670
	95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница		95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница
		Верхняя граница			Верхняя граница
	Среднее по выборке, усеченной на 5 %	6,33784644		Среднее по выборке, усеченной на 5 %	4,84142594
	Медиана	,00020200		Медиана	,00099000
	Дисперсия	140,275		Дисперсия	98,691
	Среднекв. отклонение	11,843757876		Среднекв. отклонение	9,934355210
	Минимум	,000018		Минимум	,000067
	Максимум	33,200000		Максимум	29,500000
	Диапазон	33,199982		Диапазон	29,499933
	Межквартильный диапазон	16,799970		Межквартильный диапазон	11,924883
	Асимметрия	1,506		Асимметрия	1,843
	Эксцесс	1,262		Эксцесс	3,043

Окончание табл. 3
Table 3 (end)

Названия характеристик			Статистика	Названия характеристик			Статистика
VAR4	Среднее		,98289210	VAR8	Среднее		,14588640
	95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	-,74899914		95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	-,15946166
		Верхняя граница	2,71478334			Верхняя граница	,45123446
	Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,66654100		Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,08650678
	Медиана		,00073600		Медиана		,00220500
	Дисперсия		5,861		Дисперсия		,182
	Среднекв. отклонение		2,421017014		Среднекв. отклонение		,426847151
	Минимум		,000104		Минимум		,000606
	Максимум		7,660000		Максимум		1,360000
	Диапазон		7,659896		Диапазон		1,359394
	Межквартильный диапазон		,647793		Межквартильный диапазон		,029158
	Асимметрия		2,853		Асимметрия		3,155
	Эксцесс		8,336		Эксцесс		9,968
VAR16	Среднее		,11452800	VAR31_5	Среднее		,07233600
	95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	-,09736266		95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	,03879685
		Верхняя граница	,32641866			Верхняя граница	,10587515
	Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,07393111		Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,07306389
	Медиана		,01670000		Медиана		,08430000
	Дисперсия		,088		Дисперсия		,002
	Среднекв. отклонение		,296202716		Среднекв. отклонение		,046884501
	Минимум		,003800		Минимум		,008570
	Максимум		,956000		Максимум		,123000
	Диапазон		,952200		Диапазон		,114430
	Межквартильный диапазон		,037955		Межквартильный диапазон		,111328
	Асимметрия		3,141		Асимметрия		-,507
	Эксцесс		9,900		Эксцесс		-1,376
VAR63	Среднее		,02694700	VAR125	Среднее		,00739100
	95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	,01087013		95 % Доверительный интервал для среднего	Нижняя граница	,00248830
		Верхняя граница	,04302387			Верхняя граница	,01229370
	Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,02494833		Среднее по выборке, усеченной на 5 %		,00713500
	Медиана		,01580000		Медиана		,00279500
	Дисперсия		,001		Дисперсия		,000
	Среднекв.отклонение		,022473918		Среднекв.отклонение		,006853503
	Минимум		,009470		Минимум		,001990
	Максимум		,080400		Максимум		,017400
	Диапазон		,070930		Диапазон		,015410
	Межквартильный диапазон		,030650		Межквартильный диапазон		,014243
	Асимметрия		1,738		Асимметрия		,782
	Эксцесс		2,975		Эксцесс		-1,540

Диаграммы «box-plot»

Табличные значения описательных статистик (см. табл. 3) являются информативными и не отличаются хорошей степенью наглядности. Для наглядного представления была построена диаграмма «box-plot» (рис. 4).

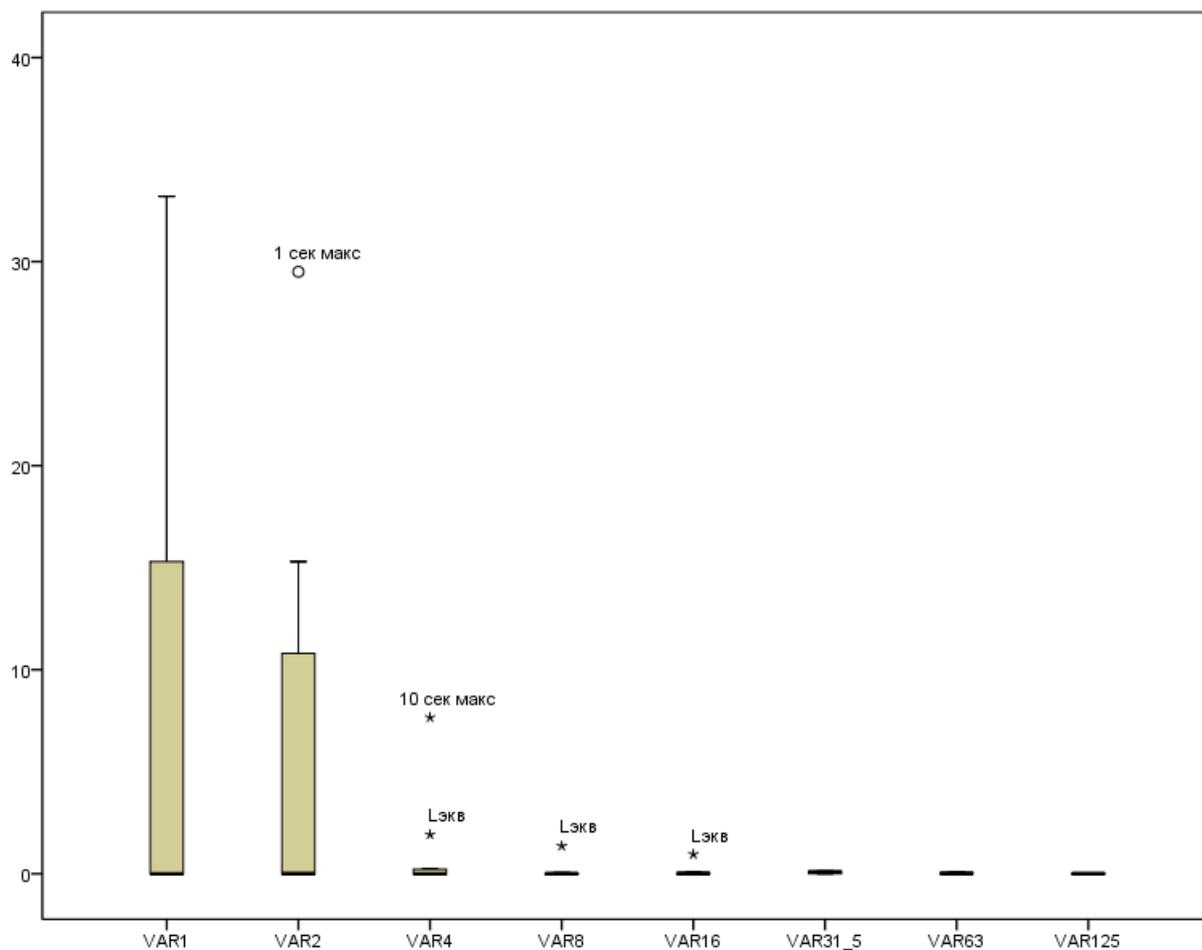


Рис. 4. Диаграмма «box-plot» для всех исходных переменных
Fig. 4. Box-plot diagram for all initial variables

Из рис. 4 видно, что наиболее широкие диапазоны изменений (в порядке убывания) имеют вибрационные режимы VAR1, VAR2 и VAR4. При этом различия в диапазонах для остальных вибрационных режимов практически нивелируются. Для выявления этих различий была построена диаграмма «box-plot» (рис. 5), исключая режимы VAR1, VAR2 и VAR4.

Диаграммы (см. рис. 4 и 5) показывают, что наиболее сильная вибрация соответствует режимам VAR1, VAR2, VAR4 и в некоторой степени VAR31_5. Для этих режимов следует ввести контрмеры по снижению вибрации для улучшения условий работы оператора.

Корреляционный анализ. Связь между исходными переменными и сила их связи

Результаты корреляционного анализа отражены в табл. 4.

Наиболее сильная корреляция наблюдается между переменными по группам: 1) VAR1, VAR2, VAR31_5, VAR63, VAR125; 2) VAR8, VAR16. Полученные результаты могут быть полезными для выявления условий сходных резонансных режимов и борьбы с ними.

Множественный регрессионный анализ

В качестве зависимой переменной выбираем Лэкв. Остальные переменные являются независимыми.

Для устранения эффекта коллинеарности программа исключает из анализа переменные К_5_сек_скз и К_10_сек_мин. Результаты множественного регрессионного анализа представлены в табл. 5.

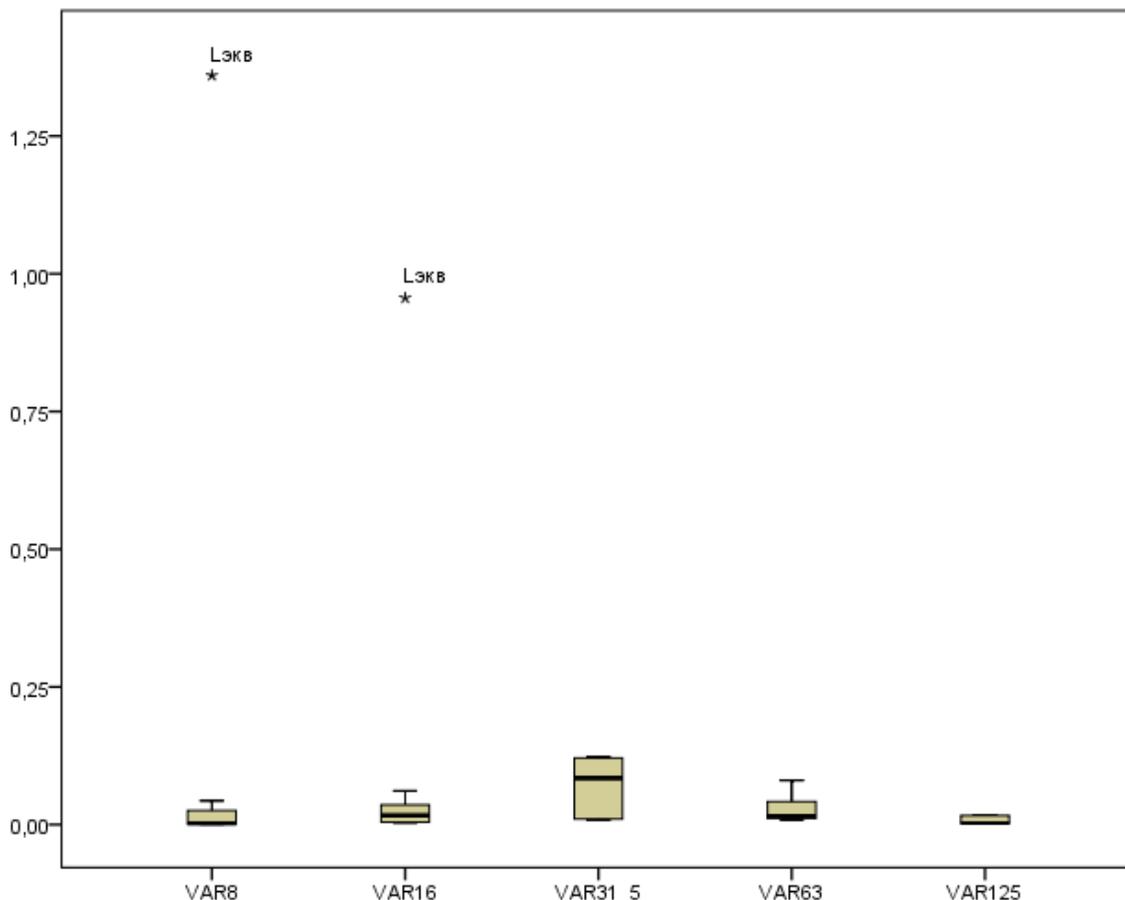


Рис. 5. Диаграмма “box-plot” для исходных переменных за исключением VAR1, VAR2, VAR4
Fig. 5. Box-plot diagram for initial variables except VAR1, VAR2, VAR4

Корреляции

Таблица 4

Correlations

Table 4

		VAR1	VAR2	VAR4	VAR8	VAR16	VAR31_5	VAR63	VAR125
VAR1	Корреляция Пирсона	1	,993**	,224	-,070	-,047	,699*	,977**	,926**
	Знач. (двухсторонняя)		,000	,535	,847	,897	,024	,000	,000
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR2	Корреляция Пирсона	,993**	1	,160	-,076	-,052	,665*	,986**	,882**
	Знач. (двухсторонняя)	,000		,658	,834	,886	,036	,000	,001
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR4	Корреляция Пирсона	,224	,160	1	,145	,148	,382	,243	,498
	Знач. (двухсторонняя)	,535	,658		,689	,683	,277	,499	,143
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR8	Корреляция Пирсона	-,070	-,076	,145	1	1,000**	,043	,032	,112
	Знач. (двухсторонняя)	,847	,834	,689		,000	,905	,931	,758
	N	10	10	10	10	10	10	10	10

		VAR1	VAR2	VAR4	VAR8	VAR16	VAR31_5	VAR63	VAR125
VAR16	Корреляция Пирсона	-,047	-,052	,148	1,000**	1	,069	,057	,132
	Знач. (двухсторонняя)	,897	,886	,683	,000		,850	,876	,715
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR31_5	Корреляция Пирсона	,699*	,665*	,382	,043	,069	1	,722*	,769**
	Знач. (двухсторонняя)	,024	,036	,277	,905	,850		,018	,009
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR63	Корреляция Пирсона	,977**	,986**	,243	,032	,057	,722*	1	,896**
	Знач. (двухсторонняя)	,000	,000	,499	,931	,876	,018		,000
	N	10	10	10	10	10	10	10	10
VAR125	Корреляция Пирсона	,926**	,882**	,498	,112	,132	,769**	,896**	1
	Знач. (двухсторонняя)	,000	,001	,143	,758	,715	,009	,000	
	N	10	10	10	10	10	10	10	10

Регрессионные коэффициенты

Таблица 5

Regression coefficients

Table 5

Модель	Нестандартизованные коэффициенты	Стандартизованные коэффициенты
	B	Бета
(Константа)	1,697	
К_1_сек_скз	1043,378	21,054
К_1_сек_мин	-7332,479	-20,376
К_1_сек_макс	-,080	-,828
К_5_сек_мин	5748,316	18,107
К_5_сек_макс	,221	1,354
К_10_сек_скз	-922,858	-19,229
К_10_сек_макс	,005	,021

Регрессионная зависимость имеет вид

$$L_{\text{экв}} = 1,697 + 1043,378 K_{1_сек_скз} - 7332,479 K_{1_сек_мин} - 0,080 K_{1_сек_макс} + 5748,316 K_{5_сек_мин} + 0,221 K_{5_сек_макс} - 922,858 K_{10_сек_скз} + 0,005 K_{10_сек_макс}.$$

Коэффициент детерминации R^2 близок к единице, что указывает на высокую адекватность построенной регрессионной модели.

Построенная регрессия позволяет делать достаточно точные прогнозы для значений переменной $L_{\text{экв}}$ и проводит надежную оценку вибрационных характеристик.

Как следует из значений стандартизованных коэффициентов (см. табл. 5), наибольшее влияние на зависимую переменную оказывают независимые переменные $K_{1_сек_скз}$, $K_{1_сек_мин}$, $K_{10_сек_скз}$ и $K_{5_сек_мин}$.

Кластерный анализ

Дендрограмма. Поиск оптимального количества кластеров

Дендрограмма представляет собой графическую иллюстрацию иерархического кластерного анализа и показывает разделение объектов изучения на кластеры, причем критерии разделения и границы кластеров заранее не задаются. Программа сама находит существенные разрывы между кластерами и по ним проводит искомые границы. В основе иерархического кластерного анализа лежат меры близости между объектами и методы организации кластеров. В качестве меры близости в нашем исследовании выбираем квадрат евклидова расстояния, а в качестве метода построения кластеров – метод Варда, в основе которого лежит построение кластеров с минимальной дисперсией [12].

Построенная дендрограмма представлена на рис. 6 и выделяет 3 четко выраженных кластера.

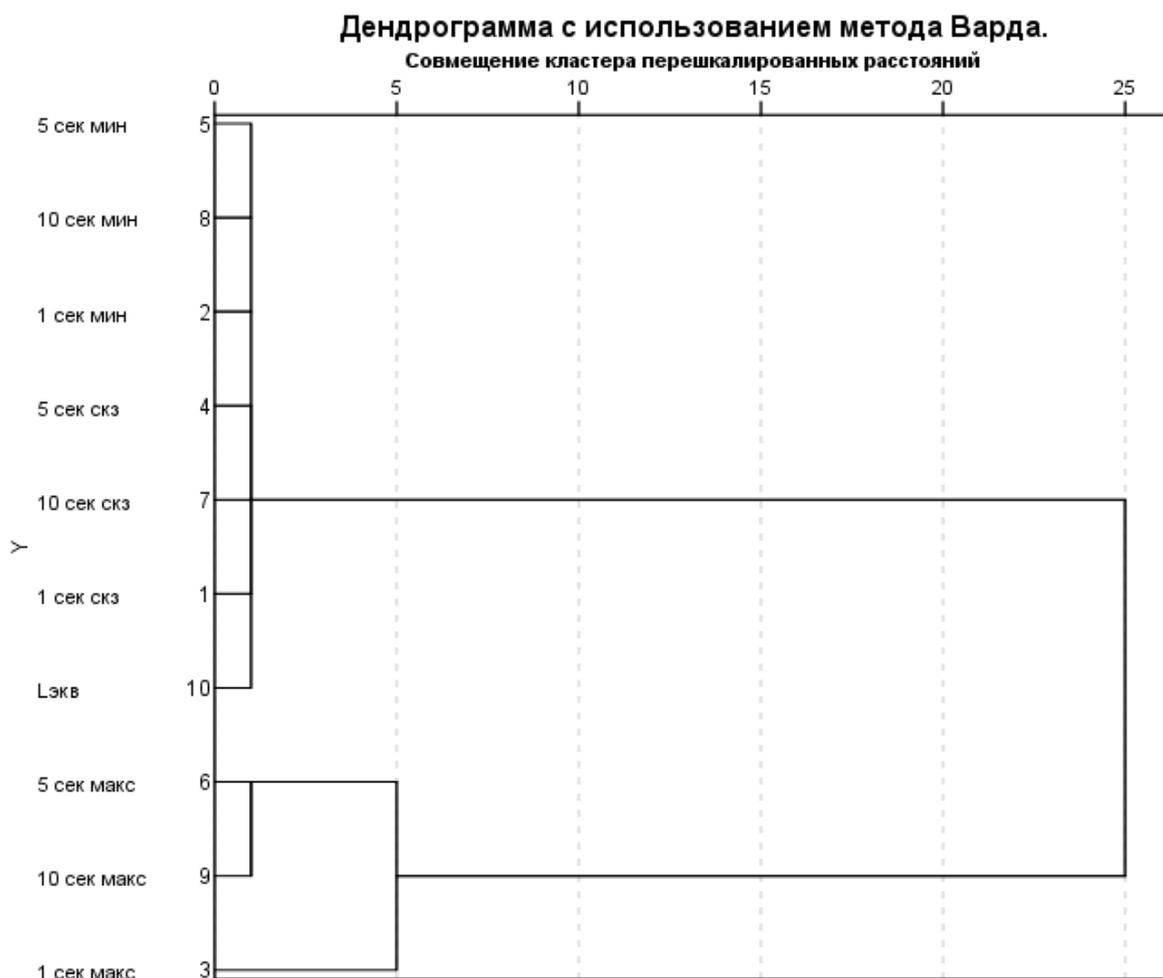


Рис. 6. Дендрограмма
Fig. 6. Dendrogram

Первый кластер включает в себя: 1 сек мин., 1 сек скз., 5 сек мин., 5 сек скз., 10 сек мин., 10 сек скз., Лэkv. Второй кластер включает: 1 сек макс. Третий кластер: 5 сек макс., 10 сек макс. Нумерация кластеров в этом случае не имеет значения.

Характеристика кластеров. Их сходство и различие

Сходство и различие кластеров определим по сравнению средних (табл. 6).

Первый кластер отличается от второго и третьего повышенными значениями переменных VAR8 и VAR9. Второй кластер характеризуется высокими значениями переменных VAR1, VAR2 и VAR 63. Третий кластер имеет высокое значение по переменной VAR4. Особенно выделяется высокими значениями вибрационных характеристик второй кластер, соответствующий перемен-

ной 1 сек макс. Этому режиму работы погрузчика следует уделить особое внимание с разработкой мероприятий по снижению вибрационной активности.

Таблица 6

Сравнение средних

Table 6

Comparison of averages

Ward Method		VAR1	VAR2	VAR4	VAR8
1	Среднее	,54866100	,38898100	,27464586	,19548057
	N	7	7	7	7
2	Среднее	33,20000000	29,50000000	,02240000	,04340000
	N	1	1	1	1
3	Среднее	18,30000000	13,05000000	3,94200000	,02355000
	N	2	2	2	2
Всего	Среднее	7,36406270	5,83228670	,98289210	,14588640
	N	10	10	10	10

Ward Method		VAR16	VAR31_5	VAR63	VAR125
1	Среднее	,14532571	,05105143	,01491000	,00333000
	N	7	7	7	7
2	Среднее	,06140000	,12300000	,08040000	,01740000
	N	1	1	1	1
3	Среднее	,03330000	,12150000	,04235000	,01660000
	N	2	2	2	2
Всего	Среднее	,11452800	,07233600	,02694700	,00739100
	N	10	10	10	10

Многомерное шкалирование

Основной целью многомерного шкалирования является графическое представление многомерной информации. Главной характеристикой при этом является близость точек на диаграмме [13–15]. Если точки расположены близко, это указывает на высокое сходство между объектами по всей совокупности переменных. Если точки расположены далеко друг от друга, то объекты сильно отличаются. Графическое представление многомерной информации облегчает интерпретацию результатов статистического анализа. Многомерное шкалирование допускается выполнять по переменным и по объектам наблюдения. В нашем случае переменными являются величины, объединенные под названием VAR, а объектами наблюдений являются временные параметры. Процедурой выполнения многомерного шкалирования выступает общепризнанный метод ALSCAL.

Многомерное шкалирование по переменным

Результаты многомерного шкалирования по переменным представлены на рис. 7.

Можно выделить три группы переменных, сходных по совокупности своих многомерных значений внутри каждой группы и существенно различных между группами. Первая группа состоит из переменных VAR1 и VAR2, вторая группа состоит лишь из одной переменной VAR4, третья группа включает все остальные переменные.

Многомерное шкалирование по наблюдениям

Результаты многомерного шкалирования по временным режимам представлены на рис. 8. Здесь можно выделить четыре группы. Каждая из первых трех групп состоит лишь из одного временного режима соответственно: 1 сек макс., 5 сек макс., 10 сек макс. Четвертая группа включает все остальные режимы. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами проведенного кластерного анализа. Отличие проявляется только в том, что третий кластер в процедуре многомерного шкалирования разбит на два отдельных временных режима.

Хорошая сходимость результатов кластерного анализа и многомерного шкалирования указывает на высокую точность проведенных статистических исследований.

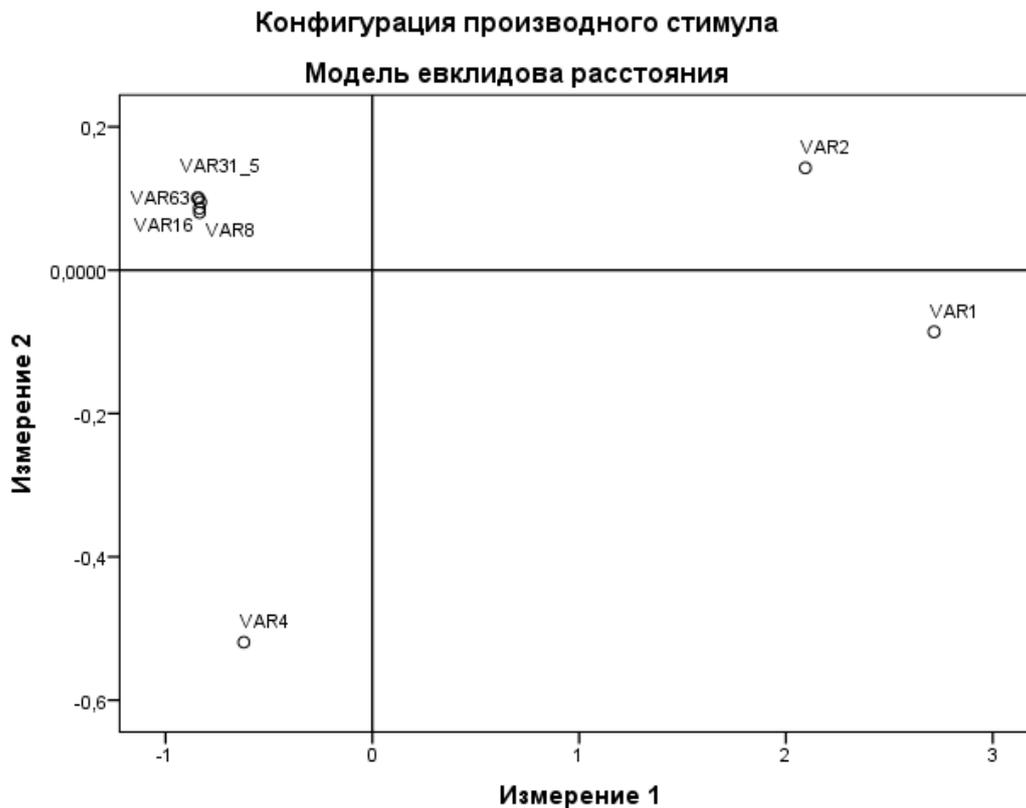


Рис. 7. Конфигурация по переменным
Fig. 7. Configuration by variables

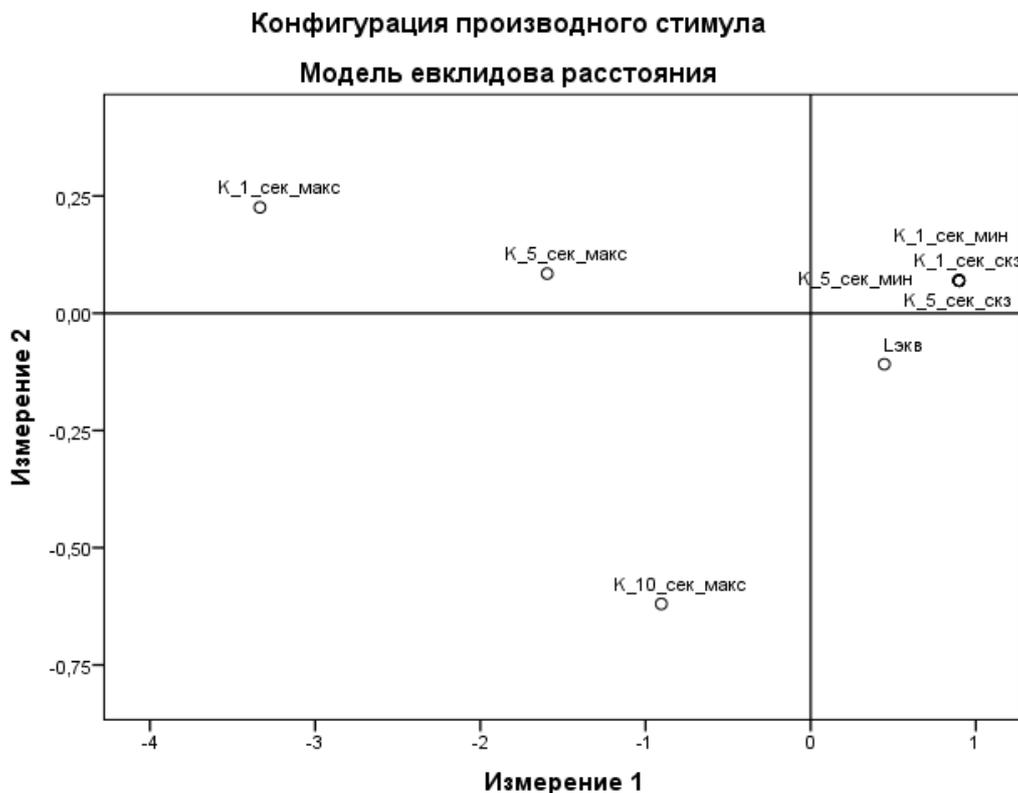


Рис. 8. Конфигурация по объектам наблюдений
Fig. 8. Configuration by observation objects

Факторный анализ

В заключение рассмотрим вопрос о возможности сокращения размерности пространства исходных переменных. Этот вопрос решается с помощью факторного анализа [16–18]. В нашем случае в качестве метода выделения факторов используем метод главных компонент. Вращение факторных осей выполнялось по методу Varimax. Диаграмма “scree plot” (диаграмма «каменистой осыпи») позволяет выделить два фактора, для которых описывающие точки лежат на крутом склоне «осыпи» (рис. 9).

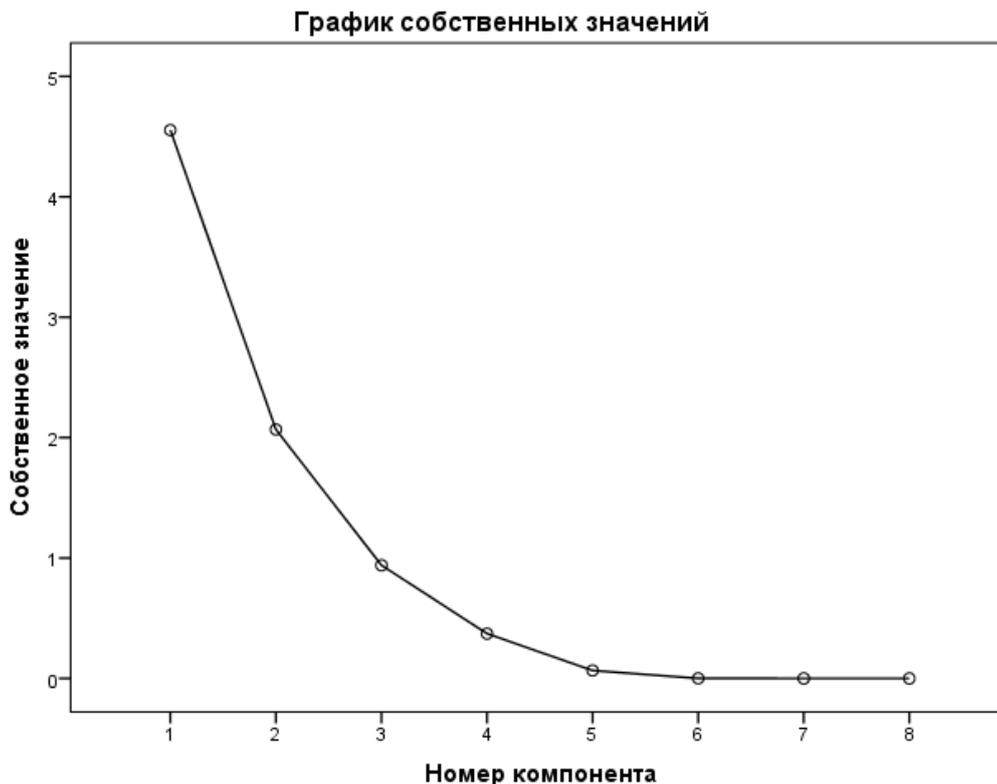


Рис. 9. Диаграмма «каменистой осыпи»
Fig. 9. Diagram “scree plot”

Повернутая матрица компонент (табл. 7) выделяет две латентные факторные оси, что указывает на возможность сократить размерность пространства исходных переменных до двух, что позволит упростить проведение статистического анализа при проведении дальнейших исследований вибраций во фронтальном погрузчике [19, 20].

Таблица 7
Повернутая матрица компонент
Table 7
Rotated component matrix

	Компонент	
	1	2
VAR1	,975	
VAR63	,970	
VAR125	,962	
VAR2	,957	
VAR31_5	,815	
VAR4	,382	
VAR8		,988
VAR16		,987

Результаты и обсуждения

Проведен статистический анализ экспериментальных данных вибрационных процессов, действующих со стороны кресла на оператора мини-погрузчика «Termit 1000». В процессе обработки информации применялось большое количество различных методов статистической обработки информации: описательные статистики, корреляционный анализ, множественная регрессия, кластерный анализ, метод главных компонент, многомерное шкалирование и другие. Широкое разнообразие статистических методов является достаточной гарантией надежности полученных результатов. Испытания погрузчика проводились в его полной комплектации в условиях, близких к условиям реальной эксплуатации погрузчика.

Выявлены режимы работы погрузчика с наибольшим проявлением негативных вибрационных эффектов. Отмечена необходимость проведения антивибрационных мероприятий, в первую очередь, по выявленным режимам. Проведен иерархический кластерный анализ, позволивший разбить режимы работы погрузчика на группы со сходными значениями вибрационных характеристик и определить существенные различия между группами. Результаты корреляционного анализа позволили выявить условия для проявления сходных резонансных режимов и борьбы с ними.

Выполненное построение диаграмм «box-plot» и многомерного шкалирования позволило наглядно, в графическом виде, представить результаты проведенного многомерного статистического анализа. Важно отметить, что, как показал факторный анализ, есть возможность снизить размерность исходного восьмимерного пространства переменных до двух, а следовательно, существенно упростить дальнейшие исследования вибрационных процессов. Это направление исследований намечено как перспективное для запланированных научных мероприятий с практической реализацией полученных результатов.

Список литературы

1. ФБУЗ «Центр гигиенического образования населения» Роспотребнадзора. Вибрационная болезнь. URL: <https://www.cge21.ru/news/6327> (дата обращения: 01.11.2024).
2. Цинцевич Л. Новые нормативы ЕС по защите водителя погрузчика от вибрации // Склад и техника, 2006. № 7. С. 1–15.
3. Болотин В.В. (Т. 1); Блехман И.И. (Т. 2); Диментберг Ф.М., Колесников К.С. (Т. 3); Лавендел Э.Э. (Т. 4); Генкин Д.М. (Т. 5); Фролов К.В. (Т. 6). Вибрации в технике. Справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1978.
4. Романченко М.К. Вибрационная защита // Технические науки в России и за рубежом: материалы II Междунар. науч. конф. М., 2012. С. 131–133.
5. Крупенин В.Л. Технологии борьбы с вибрацией // Современные наукоемкие технологии, 2010. № 5. С. 113–114.
6. Stakhova A., Kvasnikov V. Development of a device for measuring and analyzing vibrations // Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska. 2021. Vol. 11(2). P. 48–51. DOI: 10.35784/iapgos.2658
7. Kwon K.B., Shin D.Y. Optimal Design of a Mini-Loader Based on the Design of Experiments // Transactions of The Korean Society of Mechanical Engineers. 2011. P. 693–699.
8. Kim Jeong-Hun et al. Experimental Structural Safety Analysis of Front-End Loader of Agricultural Tractor // Agriculture. 2024. Vol. 1. P. 1–22.
9. Blood R.P., Rynell P.W., Johnson P.W. Whole-body vibration in heavy equipment operators of a front-end loader: Role of task exposure and tire configuration with and without traction chains // Journal of Safety Research. 2012. Vol. 43(5–6). P. 357–364.
10. Zhao X., Schindler C. Evaluation of whole-body vibration exposure experienced by operators of a compact wheel loader according to ISO 2631-1:1997 and ISO 2631-5:2004 // International Journal of Industrial Ergonomics. 2014. Vol. 44(6). P. 840–850.
11. Берикашвили В.Ш., Оськин С.П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2024. 164 с.
12. Демидова Л.А. Кластерный анализ. Python: учебное пособие. М.: РТУ МИРЭА, 2022. 103 с.
13. Delicado P., Pachón-García C. Multidimensional scaling for big data // Adv Data Anal Classif, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11634-024-00591-9>.
14. Borg I., Groenen P. Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications // Journal of Educational Measurement. 2006. Vol. 40(3). P. 277–280.
15. Deng T., Wang H., He D., et al. Multi-Dimensional Fusion Deep Learning for Side Channel Analysis // Electronics. 2023. Vol. 12(23), number 4728. <https://doi.org/10.3390/electronics12234728>.
16. Ďuriš V, Bartková R, Tírpáková A. Principal Component Analysis and Factor Analysis for an Atanassov IF Data Set // Mathematics. 2021. Vol. 9(17):2067. <https://doi.org/10.3390/math9172067>.
17. Quintero Ordóñez B, González López I, Reche Urbano E, Fuentes Esparrell JA. Application of Exploratory Factor Analysis in the Construction of a Self-Perception Model of Informational Competences in Higher Education // Mathematics. 2021. Vol. 9(18):2332. <https://doi.org/10.3390/math9182332>

18. Srivastava H.M. Mathematical Analysis and Applications II // *Axioms*. 2020. Vol. 9(1):16. <https://doi.org/10.3390/axioms9010016>.
19. Dimarogonas A.D. The origins of vibration theory // *Journal of Sound and Vibration*. 1990. Vol. 140(2). P. 181–189.
20. Bagri I., Tahiry K., Hraiba A., Touil A., Mousrij A. Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review // *Vibration*. 2024. Vol. 7(4). P. 1013–1062. <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>.

References

1. FBUZ “Tsentri gigiyenicheskogo obrazovaniya naseleniya” Rospotrebnadzora. *Vibratsionnaya bolezni* [Federal Budgetary Institution of Healthcare “Center for Hygienic Education of the Population” of Rospotrebnadzor. *Vibration Disease*]. URL: <https://www.cge21.ru/news/6327> (date accessed: 01.11.2024).
2. Tsintsevich L. New EU standards for forklift driver protection from vibration. *Warehouse and Equipment*, 2006, no. 7, pp. 1–15 (In Russ.).
3. Bolotin V.V. (Vol. 1); Blekhman I.I. (Vol. 2); Dimentberg F.M., Kolesnikov K.S. (Vol. 3); Lavendell E.E. (Vol. 4); Genkin D.M. (Vol. 5); Frolov K.V. (Vol. 6). *Vibratsii v tekhnike. Spravochnik* [Vibrations in Technology. Handbook]. (in 6 volumes). Moscow, 1978.
4. Romanchenko M.K. Vibration protection. *Engineering sciences in Russia and abroad: proc. II Intern. scientific conf.*, Moscow, 2012. pp. 131–133. (In Russ.)
5. Krupenin V.L. Vibration control technologies. *Modern science-intensive technologies*, 2010, no. 5, pp. 113–114. (In Russ.)
6. Stakhova A., Kvasnikov V. Development of a device for measuring and analyzing vibrations. *Information technology, automation, Pomiary W State University I Ochronie Środowiska*, 2021, vol. 11(2), pp. 48–51. DOI: 10.35784/iapgos.2658
7. Kwon K.B., Shin D.Y. Optimal Design of a Mini-Loader Based on the Design of Experiments. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 2011, pp. 693–699.
8. Kim Jeong-Hun et al. Experimental Structural Safety Analysis of Front-End Loader of Agricultural Tractor. *Agriculture*, 2024, vol. 1, pp. 1–22.
9. Blood R.P., Rynell P.W., Johnson P.W. Whole-body vibration in heavy equipment operators of a front-end loader: Role of task exposure and tire configuration with and without traction chains. *Journal of Safety Research*, 2012, vol. 43(5–6), pp. 357–364.
10. Zhao X., Schindler C. Evaluation of whole-body vibration exposure experienced by operators of a compact wheel loader according to ISO 2631-1:1997 and ISO 2631-5:2004. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, vol. 44(6), pp. 840–850.
11. Berikashvili V.Sh., Oskin S.P. Statistical data processing, experimental design and random processes: a tutorial for universities. Moscow, 2024. 164 p. (In Russ.).
12. Demidova L.A. *Klasternyy analiz. Python* [Cluster analysis. Python]. Moscow, 2022. 103 p.
13. Delicado P., Pachón-García C. Multidimensional scaling for big data. *Adv Data Anal Classif*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11634-024-00591-9>.
14. Borg I., Groenen P. Modern Multidimensional Scaling: Theory and Applications. *Journal of Educational Measurement*, 2006, vol. 40(3), pp. 277–280.
15. Deng T., Wang H., He D., et al. Multi-Dimensional Fusion Deep Learning for Side Channel Analysis. *Electronics*. 2023, vol. 12(23), 4728. <https://doi.org/10.3390/electronics12234728>.
16. Ďuriš V, Bartková R, Tirpáková A. Principal Component Analysis and Factor Analysis for an Atanassov IF Data Set. *Mathematics*. 2021, vol. 9(17):2067. <https://doi.org/10.3390/math9172067>.
17. Quintero Ordóñez B, González López I, Reche Urbano E, Fuentes Esparrell JA. Application of Exploratory Factor Analysis in the Construction of a Self-Perception Model of Informational Competences in Higher Education. *Mathematics*, 2021, vol. 9(18):2332. <https://doi.org/10.3390/math9182332>
18. Srivastava H.M. Mathematical Analysis and Applications II. *Axioms*, 2020, vol. 9(1):16. <https://doi.org/10.3390/axioms9010016>.
19. Dimarogonas A.D. The origins of vibration theory. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, vol. 140(2), pp. 181–189.

20. Bagri I, Tahiry K, Hraiba A, Touil A, Mousrij A. Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review. *Vibration*, 2024, vol. 7(4), pp. 1013–1062. <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>.

Информация об авторах

Авдалов Юрий Александрович, председатель совета директоров, Курганский завод дорожных машин «Кургандормаш», Курган, Россия; Avdalov_yua@kzdm.ru

Закиров Рамиль Агзамович, к.т.н., директор Научно-исследовательского института опытного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zakirovra@susu.ru

Алюков Сергей Викторович, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alysergey@gmail.com

Варкова Наталья Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Цифровая экономика и информационные технологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; varkovani@susu.ru

Information about the authors

Yuri A. Avdalov, chairman of the Board of Directors, Kurgan Plant of Road Machines “Kurgandormash”, Kurgan, Russia; Avdalov_yua@kzdm.ru

Ramil A. Zakirov, PhD, Director of the Research Institute of Experimental Mechanical Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; zakirovra@susu.ru

Sergei V. Aliukov, doctor of engineering sciences, professor of the Department of Automobile Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alysergey@gmail.com

Natalia Yu. Varkova, senior lecturer, Department of Digital Economy and Information Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; varkovani@susu.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2024; принята к публикации 12.11.2024
The article was submitted 06.11.2024; accepted for publication 12.11.2024