DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

Оригинальное исследование

Определение упруго-демпфирующих характеристик адаптивной системы подрессоривания для выработки оптимального управления имитационным стендом

З.А. Годжаев, С.Е. Сенькевич, И.С. Малахов, Е.Н. Ильченко, С.Ю. Уютов

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Следует отметить, что оптимизация системы подрессоривания и параметров ее работы, а также активное регулирование в зависимости от опорной поверхности, позволяет существенно влиять на сопротивление усталости, комфортность при эксплуатации, обеспечивая плавность хода, снижение давления на почву, общую энергоэффективность МЭС. Поэтому в данном подходе проводятся теоретические расчёты с целью нахождения оптимального диапазона для управления имитационным стендом для изучения параметров активной системы подрессоривания.

Целью работы является разработка оптимальных рабочих условий системы управления имитационным стендом, минимизация вибраций и колебаний, прогнозирование поведения системы в различных условиях и режимах эксплуатации.

Материалы и методы. В основе разработки оптимального управления лежит анализ научных работ, в т.ч. публикаций, научных статей и других источников информации по подходам поиска оптимального управления исполняющим устройством в системе активной подвески с целью наиболее эффективного гашения колебаний, возникающих вследствие дорожных неровностей. Использован метод теоретического расчёта трёхфакторного эксперимента. Получены основные зависимости.

Результаты. Полученные уравнения имеют высокий уровень значимости. Графическое представление позволяет провести качественную оценку точности полученных решений. Уравнения позволяют управлять параметрами адаптивной системы подрессоривания по нескольким критериям. Каждый критерий, входящий в уравнение, имеет влияние на саму функцию. Для выработки оптимального управления, полученные уравнения применяются при разработке программного обеспечения.

Заключение. Практическая значимость заключается в разработанных уравнениях для программного обеспечения поиска оптимального управления имитационным стендом. Установлена связь между независимыми переменными такими как: скорость, высота микропрофиля и жёсткость подвески.

Ключевые слова: адаптивная система; пневмоэлемент; жёсткость; динамика; мобильное энергетическое средство; математическая модель; подрессоренная и неподрессоренная массы; колебания; профиль дорожного покрытия.

Как цитировать:
Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Малахов И.С., Ильченко Е.Н., Уютов С.Ю. Определение упруго-демпфирующих характеристик адаптивной системы подрессоривания для выработки оптимального управления имитационным стендом // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 355–368. DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

Рукопись получена: 14.06.2024 **Рукопись одобрена:** 06.07.2024 **Опубликована online:** 06.07.2024

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

Original Study Article

Determination of stiffness and damping characteristics of the adaptive suspension system to develop the optimal control of the simulation bench

Zakhid A. Godzhaev, Sergey E. Senkevich, Ivan S. Malakhov, Ekaterina N. Ilchenko, Sergey Yu. Uyutov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Optimization of the suspension system, its operating parameters, as well as active adjustment depending on the ground surface can significantly affect the fatigue resistance, improve comfort during operation ensuring smoothness of ride, reduce the pressure on ground, increase the overall energy efficiency of the mobile energy unit. Therefore, in this approach, there are theoretical calculations to find the optimal range for control of the simulation bench to study the parameters of the active suspension system.

AIM: Development of optimal operating conditions of the control system of the simulation bench, minimization of vibrations and oscillations, prediction of the system behavior in different conditions and modes of operation.

METHODS: The development of optimal control is based on the analysis of scientific works, including publications, scientific papers and other sources of information on the approaches to the development of optimal control of the performing device in the active suspension system for the most effective damping of vibrations arising from road unevenness. The method of theoretical calculation of three-factor experiment was used, the main dependencies were obtained.

RESULTS: The obtained equations have a high level of significance. Graphical representation makes it possible to make a qualitative assessment of the accuracy of the obtained equations. The equations make it possible to control the parameters of the adaptive suspension system with several criteria. Each criterion included in the equation influences on the function itself. In order to develop the optimal control, the obtained equations are applied in the software development.

CONCLUSION: The practical significance lies in the developed equations for the software concerning the optimal control of the simulation bench, the relationship between independent variables such as velocity, microprofile height and suspension stiffness has been established.

Keywords: adaptive system; pneumatic element; stiffness; dynamics; mobile energy unit; mathematical model; sprung and unsprung masses; oscillations; road surface profile.

To cite this article:
Godzhaev ZA, Senkevich SE, Malakhov IS, Ilchenko EN, Uyutov SYu. Determination of stiffness and damping characteristics of the adaptive suspension system to develop the optimal control of the simulation bench. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2024;91(3):355–368.
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

Received: 14.06.2024 **Accepted:** 06.07.2024 **Published online:** 06.07.2024

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Система подрессоривания, реализующая связь движителей с кузовом и другими конструктивными элементами мобильного энергосредства (МЭС) и передающая на кузов возмущения от опорной поверхности, обеспечивает плавность хода, оказывает влияние на состояние оператора, в том числе на его комфорт при эксплуатации как при транспортном режиме, так и при технологическом. Системы подрессоривания в большинстве своём состоят из следующих основных конструктивных элементов: гасящие устройства (амортизаторы различных типов), обеспечивающие диссипацию колебаний, возникших вследствие преодоления МЭС неровностей; упругие элементы, которые обеспечивают жесткую связь между движителями и остовом (обычно применяются пневматические, резиновые, гидропневматические устройства, а также пружины, торсионы); ограничители хода подвески и стабилизаторы. Существующие различные типы подвесок, такие как зависимые и независимые, активные, адаптивные и т.д. имеют ряд преимуществ и недостатков.

В настоящей работе для контроля и оценки качества любых систем автоматического управления при разработке, проведении заводских испытаний, пуско-наладочных работах, диагностике и ремонте в процессе эксплуатации путём симуляции физических процессов объекта проводятся теоретические расчёты с целью нахождения оптимального диапазона управления имитационным стендом для исследования параметров активной системы подрессоривания. Оптимизация системы подрессоривания и параметров её работы, а также активное регулирование в зависимости от опорной поверхности, позволяет существенно повлиять на сопротивление усталости, повысить комфортность при эксплуатации обеспечивая плавность хода, снизить давление на почву, повысить общую энергоэффективность МЭС.

Целью работы является разработка оптимальных рабочих условий системы управления имитационным стендом, минимизация вибраций и колебаний, прогнозирование поведения системы в различных условиях и режимах эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе разработки оптимального управления лежит анализ научных работ, в т.ч.: публикаций, научных статей и других источников информации по подходам выработки оптимального управления исполняющим устройством в системе активной подвески с целью наиболее эффективного гашения колебаний, возникающих от дорожных неровностей. Использован метод теоретического расчёта трёхфакторного эксперимента. Получены основные зависимости.

Многочисленные научные труды [1–3], посвященные математическому описанию МЭС, как динамической системы, в части системы подрессоривания, подтверждают особую актуальность, целесообразность и высокую эффективность улучшения и оптимизации установки систем адаптивного управления системами подрессоривания мобильных энергетических средств.

Согласно проведённым исследованиям, в части применения адаптивных систем подрессоривания, в работе [4] показана высокая эффективность работы адаптивной системы подрессоривания кабины. В указанной работе, по представленным осциллограммам, можно сделать вывод о высокой эффективности разработанной системы, позволяющей снизить амплитуды колебаний до 50% на различных частотах. Применение данной системы существенно влияет на условия работы оператора МЭС.

В статье [5], посвящённой адаптивной системе подрессоривания, особое внимание уделяется работе различных контроллеров, обеспечивающих эффективное гашение колебаний вследствие воздействия на движители МЭС неровностей опорной поверхности. Приведённые расчёты и графики демонстрируют возможность эффективного гашения колебаний посредством различных контроллеров адаптивного управления.

Гашение колебаний в системах подрессоривания навесного оборудования, также является немаловажным аспектом в улучшении динамических свойств полнокомплектных МЭС, что подтверждается в работе [6].

При решении задач оптимизации системы подрессоривания в работах [7, 8] был использован метод оптимизации роя частиц (PSO). В данном методе, каждая частица системы выполняет процесс поиска в пространстве решений приближая к оптимуму весь рой в зависимости от варианта PSO и значений параметров [8, 9]. В указанной работе векторное дифференциальное уравнение с уравнением динамического управления обратной связью сводится к замкнутой системе.

В работах [10–12] авторы предлагают формировать вектор оптимального управления демпфированием в подвеске, что позволяет учесть переходные процессы. Недостаток предложенных алгоритмов характеризуется повышенной вероятностью появления автоколебаний и скользящих режимов в управляемой подвеске. Тем не менее, метод, используемый в этих работах, показал высокую эффективность в части гашения колебаний по сравнению с неуправляемой подвеской.

Большое количество трудов посвящено выработке и нахождению оптимального закона управления адаптивной системой подрессоривания [13–15], основанными на различных подходах. Высокая эффективность полученных решений подтверждается моделированием. В работе [16] моделируется квазиоптимальная функция, с которой сопоставляется оптимальный закон управления.

Проанализировав приведённые материалы, можно сделать вывод о целесообразности и высокой эффективности систем адаптивного управления системой подрессоривая. Применение данных систем в различных конструктивных элементах: система подрессоривания кабины, навесное оборудование (штанговый опрыскиватель), а также в системе

подвески мобильного энергосредства демонстрирует значительное снижение амплитуд колебаний как при непосредственном воздействии дорожной неровности или раскачки, так и при последующем затухании колебаний.

Применение адаптивно регулируемого ПЭ не получило реализацию в конструкциях систем подрессоривания как многоосновных автомобилей, так и колёсных машин с формулой 4×4. Однако, является перспективным направлением улучшения как отдельно системы подрессоривания, так и параметров всего МЭС при выполнении технологических или транспортных операций. Разработанные подходы оптимального управления позволяют исполнительным устройствам наиболее корректно и эффективно оказывать управляющее воздействие. По совокупности разрабатываемых моделей оптимального управления, формировании целевой функции, данные подходы, реализующие оптимальное управления являются трудоёмкими, что открывает поле для решения, поставленной задачи автоматизированным подходом по входным параметрам.

Для оптимального управления имитационным стендом следует определить зависимость упруго-демпфирующих характеристик адаптивной системы подрессоривания МЭС от скорости движения и высоты неровностей опорной поверхности, по которой происходит движение МЭС.

Для проведения исследований нами была разработана математическая модель колебательной системы сельскохозяйственного мобильного энергетического средства с навесным оборудованием для исследования её адаптивной системы подрессоривания, описанная в работе [17]. Обоснование диапазона изменения упругодемпфирующих и инерционных характеристик колебательной системы сельскохозяйственной МЭС с навесным технологическим оборудованием для проведения исследований представлены в работе [18]. Исследование динамических характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств позволило определить значения факторов [19].

В результате математического моделирования, были получены ускорения отдельных подрессоренных масс МЭС (центра масс остова, центра масс навесной машины и центра масс кабины). Опираясь на результаты моделирования, полученные значения ускорений позволили рассчитать коэффициенты изменения ускорений и интенсивности. Для навесной машины и остова рассчитаны коэффициенты изменения ускорений $K_{1дин}$ и $K_{2дин}$ соответственно, а для кабины — коэффициент интенсивности $K_{инт}$.

Коэффициент изменения ускорений $K_{дин}$ рассчитывался по формуле:

$$K_{дин} = \frac{A_у(t+\tau)}{A_м(t)}, \quad (1)$$

где $A_у$ — установившаяся амплитуда ускорения, м/с^2; $A_м$ — максимальная амплитуда ускорения м/с^2.

Коэффициент интенсивности $K_{инт}$ рассчитывался по формуле [20, 21]:

$$K_{инт} = \frac{18}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \cdot \sigma_{\ddot{z}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\ddot{z}}$ — среднее квадратическое отклонение вертикальных ускорений при гармонических колебаниях; ω_0 = 62,8 с$^{-1}$ — частота приведения; ω — частота колебаний.

Из всех возможных факторов было выделено три: жёсткость ПЭ подвески переднего моста МЭС, высота неровности микропрофиля и скорость движения трактора. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

Переход от кодированных значений x к натуральным X производится по формулам:

$$x = \frac{X - f_0}{i_{инт}}, \quad (3)$$

где X — натуральное значение i-го фактора; f_0 — натуральное значение основного уровня i-го фактора (на нулевом уровне); $i_{инт}$ — интервал варьирования i-го фактора.

В качестве плана трёхфакторного эксперимента (план типа 3^3) был выбран некомпозиционный план второго порядка, матрица которого, представлена в табл. 2.

Для получения матрицы результатов Y были использованы данные, полученные с помощью уравнений (1) и (2). Коэффициент изменения ускорений $K_{дин}$ рассчитывался по формуле (1). Коэффициент интенсивности $K_{инт}$ рассчитывался по формуле (2).

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов
Table 1. Levels and intervals of factors variation

Наименование факторов	Обозначение Факторов	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	Натуральные значения, соответствующие уровням кодированных факторов		
				Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)
Жёсткость ПЭ подвески переднего моста	C_{p1}, Н/м	X_1	$190 \cdot 10^3$	$460 \cdot 10^3$	$270 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$
Высота неровности микропрофиля	H_1, м	X_2	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$
Скорость движения	V_{tr}, м/с	X_3	2,0	5,0	3,0	1,0

Таблица 2. Матрица некомпозиционного трёхфакторного плана второго порядка
Table 2. Matrix of non-compositional three-factor second order experiment design

№ опыта	x0	x1	x2	x3	x1·x2	x1·x3	x2·x3	x12	x22	x32
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
7	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1
8	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1
9	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
12	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1
13	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1
14	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого опыта было получено три наблюдения ($y_1 = K_{1\text{дин}}$, $y_2 = K_{\text{инт}}$, $y_3 = K_{2\text{дин}}$), значения которых представлены в табл. 3.

В связи с тем, что наблюдений для каждого опыта три, необходимо будет получить три уравнения регрессии. Общий вид этих уравнения по плану экспериментов имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + b_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_1^2 + b_8 \cdot x_2^2 + b_9 \cdot x_3^2. \quad (4)$$

Для каждого уравнения будут меняться коэффициенты b.

Все расчёты проводятся в программной среде Mathcad. Чтобы вычислить коэффициенты уравнения регрессии, план эксперимента и наблюдения необходимо занести в матрицы X и Y.

Таким образом, формулы коэффициентов регрессии имеет вид:

$$B = \left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot X^T \cdot Y. \quad (5)$$

Из формулы (5) получается матрица коэффициентов B (табл. 4).

В табл. 4 применены следующие обозначения: где b_a — коэффициенты уравнения регрессии при наблюдениях y_1, b_b — коэффициенты уравнения регрессии при наблюдениях y_2, b_c — коэффициенты уравнения регрессии при наблюдениях y_3. В дальнейшем индексы a, b, c также будут указывать на принадлежность к тому или иному уравнению.

Таблица 3. Значения наблюдений для всех опытов
Table 3. Observed values for all the experiments

№ опыта	y_1	y_2	y_3
1	0,294	0,055	-0,754
2	0,286	0,576	-0,707
3	0,224	0,636	-0,196
4	0,436	0,025	0,111
5	0,353	0,591	0,039
6	0,239	0,068	-0,904
7	0,482	0,258	0,149
8	0,414	0,032	0,050
9	0,972	0,283	0,887
10	0,353	0,591	0,039
11	0,484	0,035	0,031
12	0,678	0,273	0,532
13	0,366	0,064	-0,038
14	0,681	0,275	0,558
15	0,353	0,591	0,039

Далее необходимо проверить адекватность уравнения регрессии. Для этого используется критерий Фишера [22]:

$$F = \frac{D_a}{D_y}, \quad (6)$$

где Da — дисперсия адекватности; Dy — остаточная дисперсия.

Остаточная дисперсия Dy может быть принята условно, а не рассчитываться. Это возможно, так

Таблица 4. Коэффициенты b для каждого уравнения
Table 4. Values of the b coefficients for each equation

№ коэф.	b_a	b_b	b_c
0	0,353	0,591	0,039
1	-0,093	-0,003	-0,383
2	-0,011	0,007	-0,039
3	-0,164	-0,111	-0,373
4	0,055	-0,283	0,065
5	0,079	0,015	-0,054
6	0,030	-0,007	0,024
7	-0,034	-0,135	-0,325
8	-0,009	-0,133	-0,100
9	0,208	-0,296	0,332

как выборка наблюдений не случайная, а расчётная. Принято, что $Dy = 0{,}05$.

Определение разности коэффициентов произведём в Mathcad и запишем в матрицу MD по формуле $MD = Y - Yr$. Полученные значения y_r и MD представлены в табл. 5.

Для визуальной оценки адекватности уравнений можно построить графики с y и y_r (рис. 1). Графики, наглядно показывающие расхождение кривых наблюдений — y и кривых полученных с помощью полинома (расчётных кривых — y_r) представлены на рис. 1.

Формула (6) в системе Mathcad имеет вид:

$$D_a = \frac{\sum MD^2}{3}. \qquad (9)$$

Итоговые значения дисперсии адекватности и критерия Фишера представлены в табл. 6.

Для оценки адекватности уравнений, определяем критерий Фишера. Табличное значение критерия составляет $F_{таб} = 3{,}59$. В нашем случае $F_a < F_{таб}$, $F_b < F_{таб}$, $F_c < F_{таб}$ — следовательно, все три уравнения адекватны.

Найдём критические точки для каждого уравнения — это значения x_1, x_2, x_3. Для этого возьмём частные производные по этим переменным и приравняем их к нулю. В общем виде частные производные представлены следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} 2 \cdot b_7 \cdot x_1 + b_4 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_3 + b_1 = 0 \\ b_4 \cdot x_1 + 2 \cdot b_8 \cdot x_2 + b_6 \cdot x_3 + b_2 = 0 \\ b_5 \cdot x_1 + b_6 \cdot x_2 + 2 \cdot b_9 \cdot x_3 + b_3 = 0 \end{cases}. \qquad (10)$$

Для вычисления корней x в среде Mathcad необходимо заполнить две матрицы: матрицу коэффициентов при переменных $x(Ax)$ и матрицу свободных коэффициентов (Bs). Так как начальная формула этого расчёта выглядит как $Ax \cdot X = Bs$, а имеющиеся у нас свободные коэффициенты стоят в левой части уравнения, для старта расчёта необходимо перенести значения Bs в правую сторону, т.е. взять эти коэффициенты с минусом. Тогда, матрицы Ax и Bs будут выглядеть:

$$Ax = \begin{bmatrix} 2 \cdot b_7 & b_4 & b_5 \\ b_4 & 2 \cdot b_8 & b_6 \\ b_5 & b_6 & 2 \cdot b_9 \end{bmatrix}, \quad Bs = \begin{bmatrix} -b_1 \\ -b_2 \\ -b_3 \end{bmatrix}. \qquad (11)$$

Таблица 5. Значения матриц y_r и MD
Table 5. Values of the y_r and the MD matrices

Yra	Yrb	Yrc	Mda	MDb	MDc
0,261	0,045	-0,744	0,033	0,010	-0,010
0,173	0,596	-0,796	0,113	-0,020	0,089
0,337	0,616	-0,107	-0,113	0,020	-0,089
0,470	0,035	0,101	-0,033	-0,010	0,010
0,353	0,591	0,039	0,000	0,000	0,000
0,349	0,062	-0,765	-0,110	0,006	-0,139
0,519	0,254	0,089	-0,037	0,004	0,060
0,378	0,037	0,110	0,037	-0,004	-0,060
0,862	0,289	0,748	0,110	-0,006	0,139
0,353	0,591	0,039	0,000	0,000	0,000
0,408	0,052	-0,118	0,076	-0,016	0,149
0,675	0,287	0,582	0,003	-0,014	-0,050
0,370	0,050	-0,087	-0,003	0,014	0,050
0,757	0,259	0,706	-0,076	0,016	-0,149
0,353	0,591	0,039	0,000	0,000	0,000

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

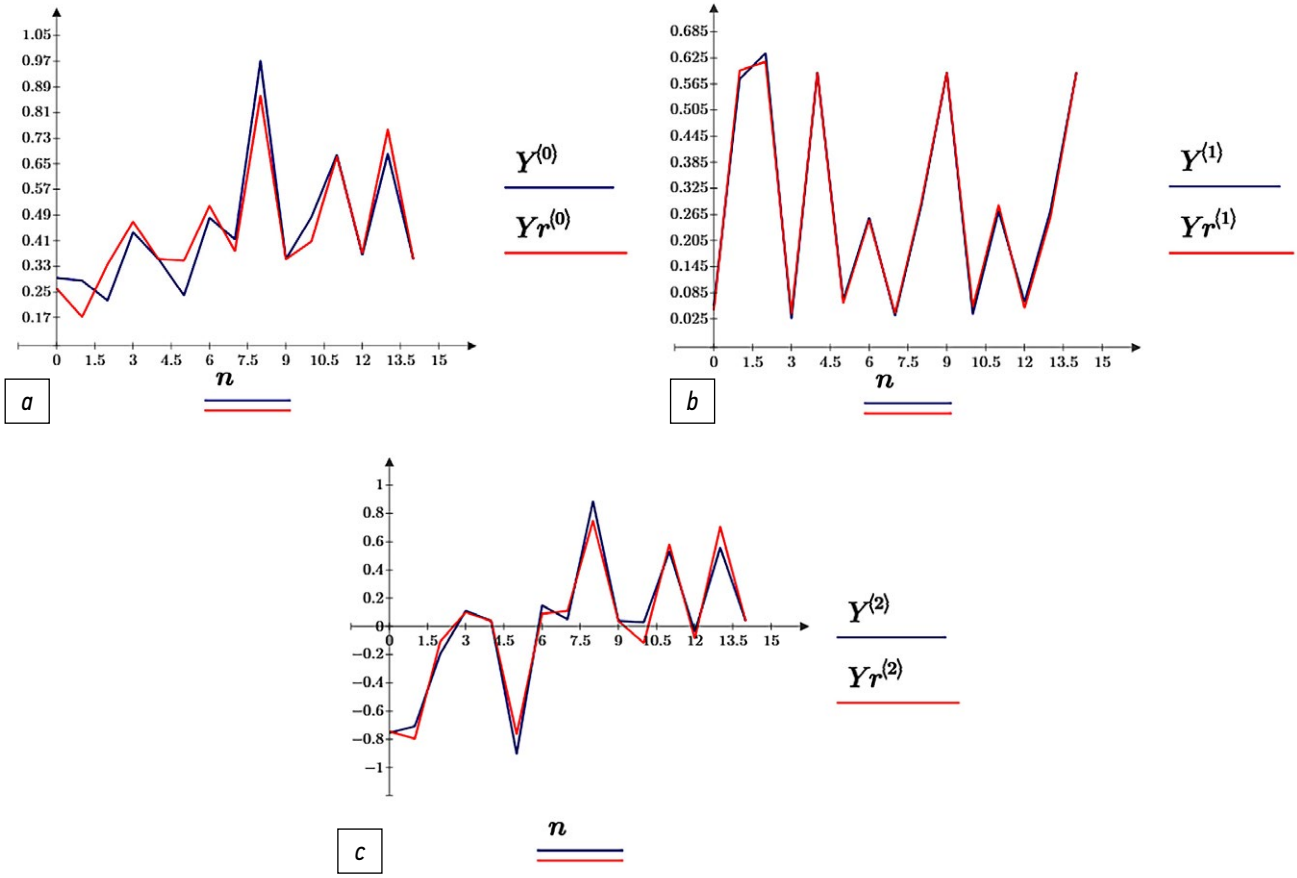

Рис. 1. Графики точности (адекватности) уравнений: *a*) — для кривой Y1, *b*) — для кривой Y2, *c*) — для кривой Y3.
Fig. 1. Graphs of accuracy (adequacy) of equations: *a* — for the Y1 curve; *b* — for the Y2 curve; *c* — for the Y3 curve.

Используя метод обратной матрицы, получим уравнение $X = Ax^{-1} \cdot Bs$. Значения X для каждого уравнения представлены в табл. 7.

Анализ табл. 7 показывает, что изменение фактора Xa и Xc оказывает сильное влияние на показатель Y. Подставляя значения X в уравнение (4), получаем значения Y. При этих условиях получаем значения $y_a = 0{,}278$, $y_b = 0{,}599$, $y_c = 0{,}077$.

Используя данные табл. 1, можно получить натуральные значения x для всех наблюдений, значения которых занесены в табл. 8.

$$x_1 = \frac{C_{p1} - 270 \cdot 10^3}{190 \cdot 10^3}; \quad x_2 = \frac{H_1 - 2{,}5 \cdot 10^{-2}}{1{,}5 \cdot 10^{-2}}; \quad x_3 = \frac{V_{tr} - 3{,}0}{2{,}0} \qquad (12)$$

Далее, анализируя полученные уравнения регрессии, строим графики поверхности отклика и графики линий уровня для каждого из уравнений. При этом задаются значения x, при которых две переменные изменяются от –1, до 1, а одна равна 0. Все комбинации представлены на рис. 2–10.

Таблица 6. Значения D_a и F для всех наблюдений
Table 6. Values of D_a and F for all observations

Дисперсия адекватности	Da_a	Da_b	Da_c
	0,022	0,001	0,037
Критерий Фишера	F_a	F_b	F_c
	0,441	0,014	0,739

Таблица 7. Значения X для всех уравнений
Table 7. Values of X for all equations

№	x_a	x_b	x_c
1	1,417	0,460	-0,667
2	3,642	-0,457	-0,349
3	-0,139	-0,171	0,520

Таблица 8. Натуральные значения X для всех уравнений
Table 8. Natural values of X for all equations

№	x_a	x_b	x_c
1	539324	0,032	1,665
2	961899	0,018	2,303
3	243573	0,022	4,041

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-633446

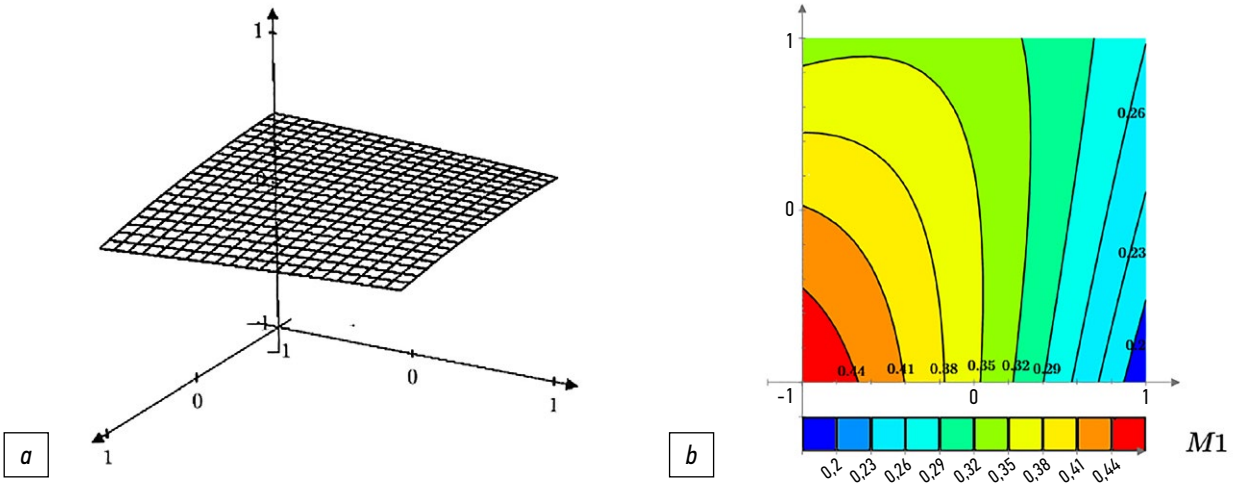

Рис. 2. Графики поверхности отклика для Y_1 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= –1...1, x_3= 0.
Fig. 2. Graphs of response surface for the Y_1 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= -1..1, x_3= 0.

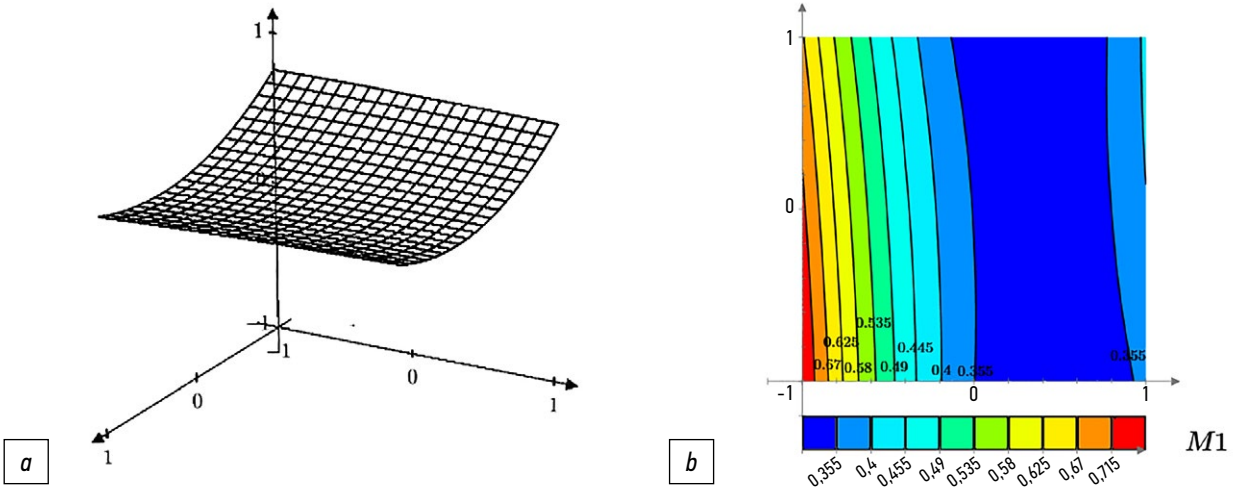

Рис. 3. Графики поверхности отклика Y_1 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= 0, x_2= –1...1, x_3= –1...1.
Fig. 3. Graphs of response surface for the Y_1 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= 0, x_2= -1..1, x_3= -1..1.

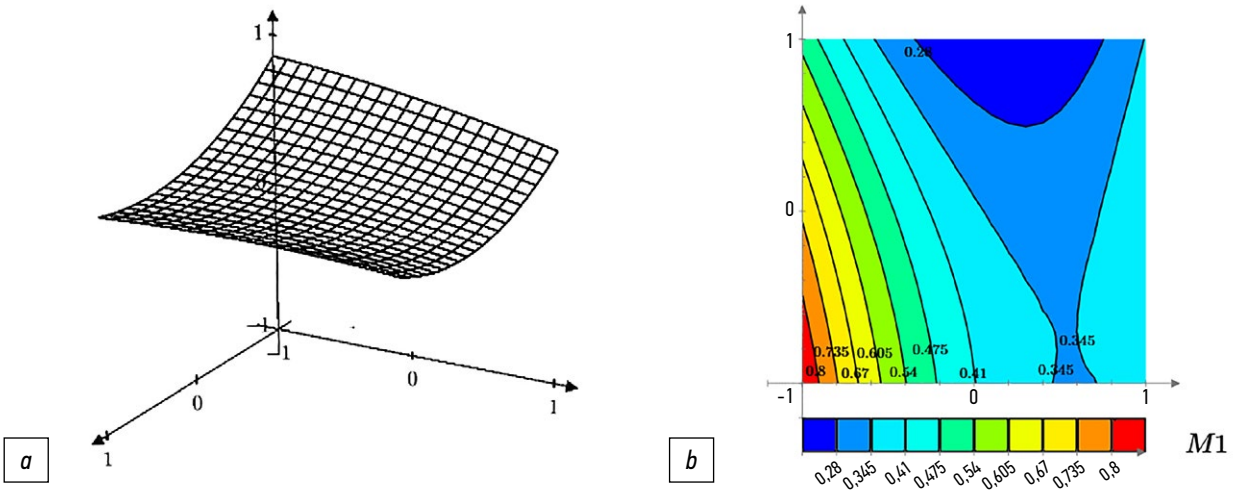

Рис. 4. Графики поверхности отклика Y_1 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= 0, x_3= –1...1.
Fig. 4. Graphs of response surface for the Y_1 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= 0, x_3= -1..1.

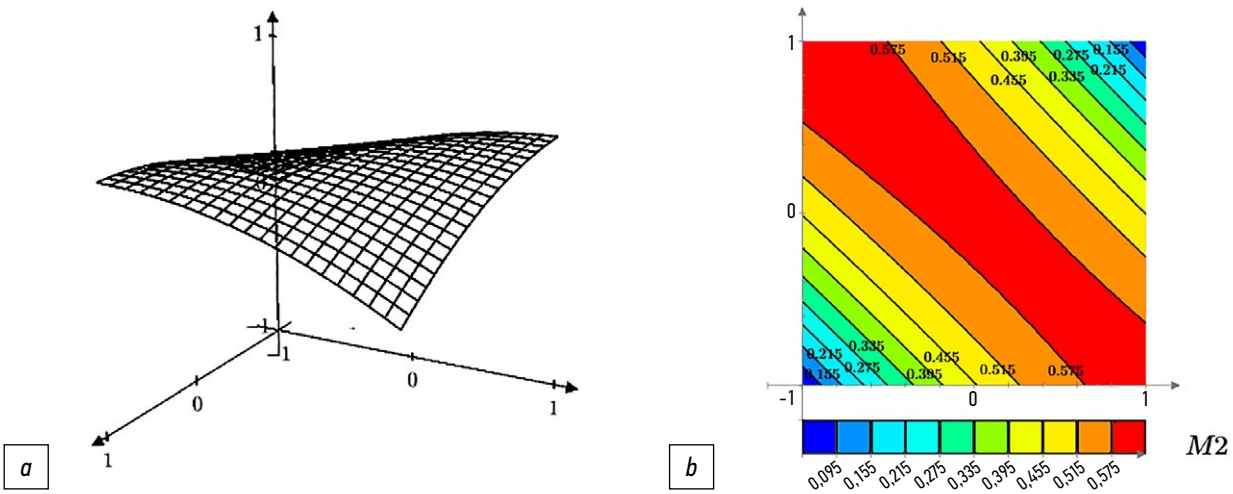

Рис. 5. Графики поверхности отклика Y_2 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= –1...1, x_3= 0.
Fig. 5. Graphs of response surface for the Y_2 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= -1..1, x_3= 0.

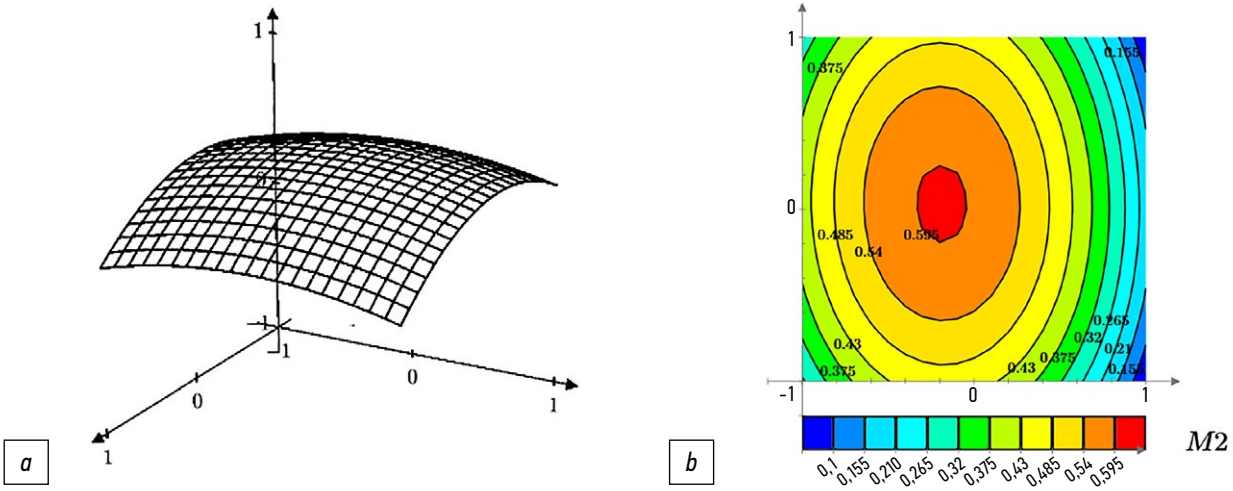

Рис. 6. Графики поверхности отклика Y_2 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= 0, x_2= –1...1, x_3= –1...1.
Fig. 6. Graphs of response surface for the Y_2 (*a*) and level curves (*b*) at x_1=0, x_2= -1..1, x_3= -1..1.

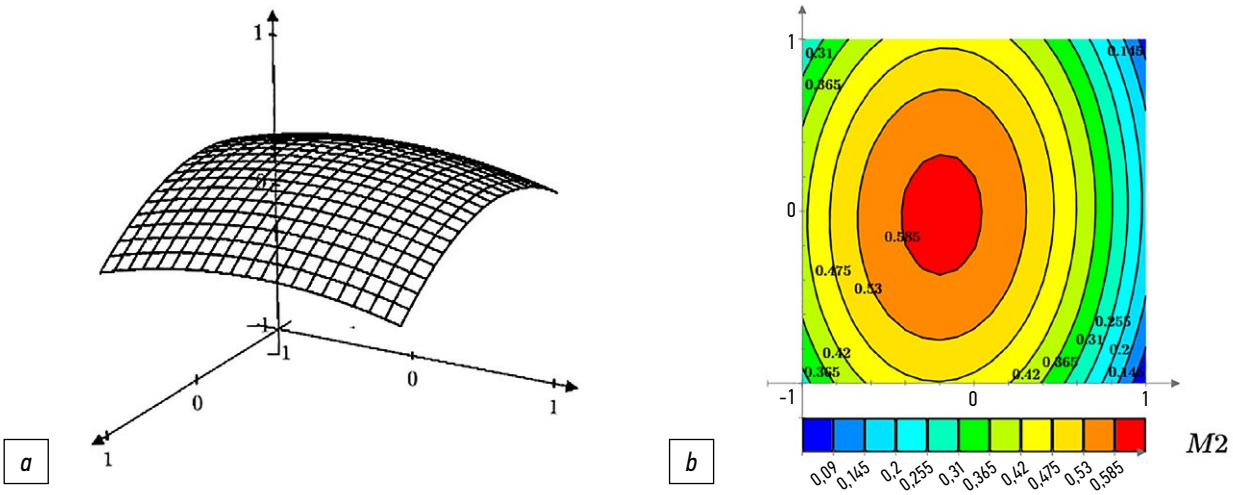

Рис. 7. Графики поверхности отклика Y_2 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= 0, x_3= –1...1.
Fig. 7. Graphs of response surface for the Y_2 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= 0, x_3= -1..1.

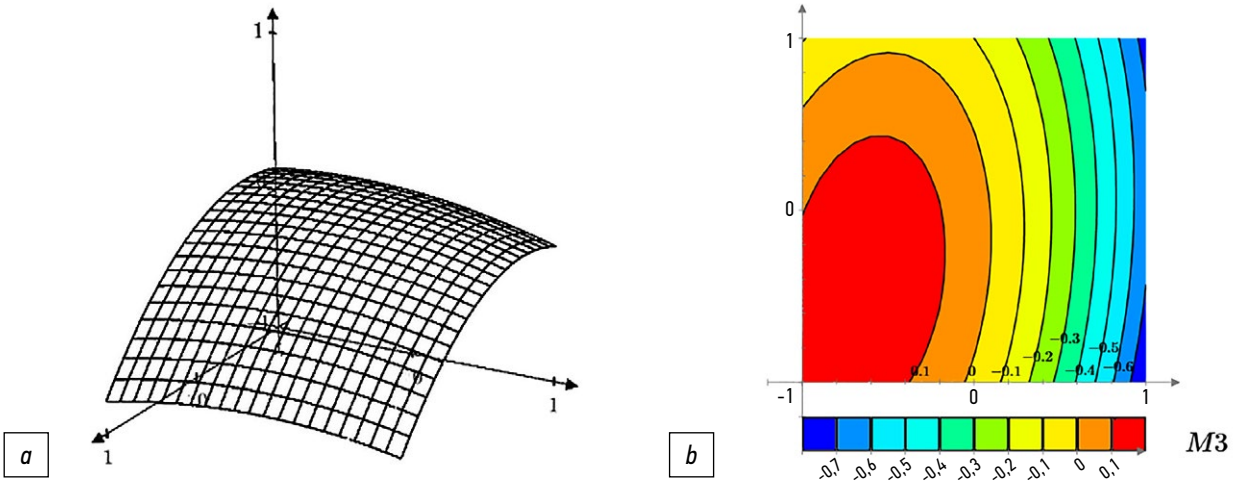

Рис. 8. Графики поверхности отклика Y_3 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= –1...1, x_3= 0.
Fig. 8. Graphs of response surface for the Y_3 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= -1..1, x_3= 0.

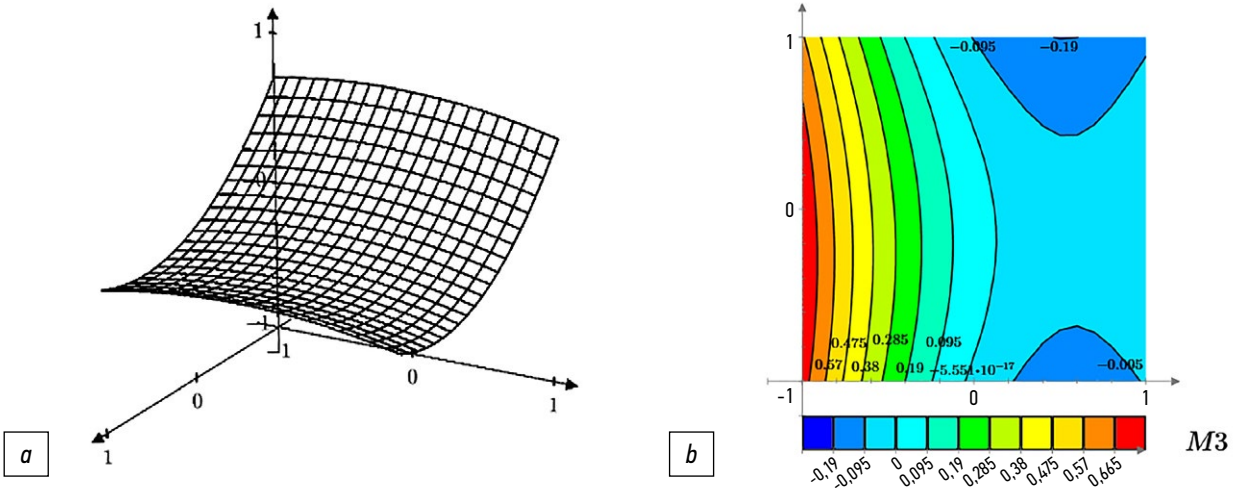

Рис. 9. Графики поверхности отклика Y_3 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= 0, x_2= –1...1, x_3= –1...1.
Fig. 9. Graphs of response surface for the Y_3 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= 0, x_2= -1..1, x_3= -1..1.

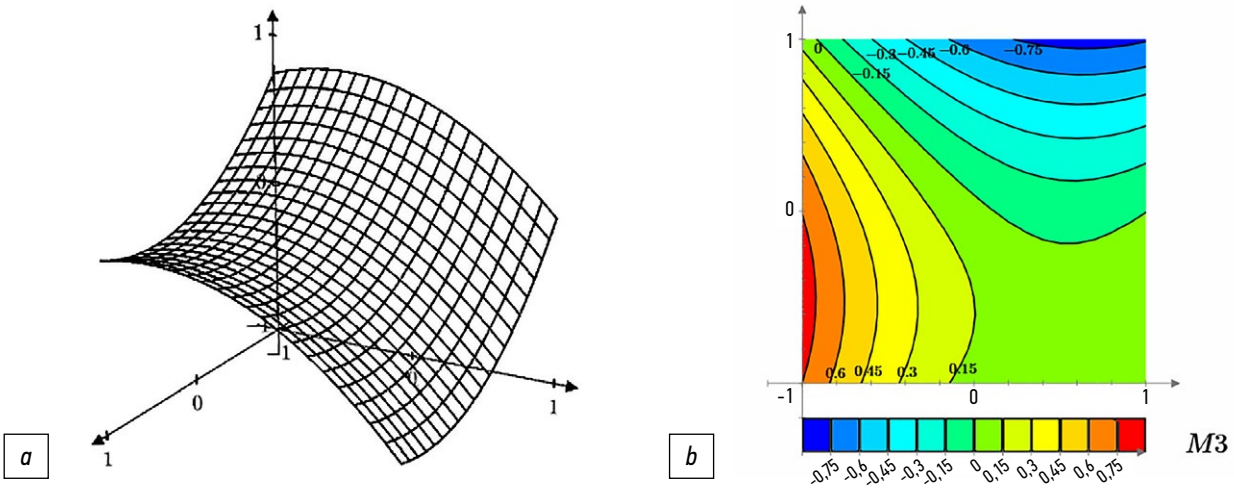

Рис. 10. Графики поверхности отклика Y_3 (*a*) и линии уровня (*b*) при x_1= –1...1, x_2= 0, x_3= –1...1.
Fig. 10. Graphs of response surface for the Y_3 (*a*) and level curves (*b*) at x_1= -1..1, x_2= 0, x_3= -1..1.

Полученные уравнения, имеют высокий уровень значимости. Графическое представление позволяет провести качественную оценку точности полученных уравнений. Уравнения позволяют управлять параметрами адаптивной системы подрессоривания по нескольким критериям. Каждый критерий, входящий в уравнение, имеет влияние на саму функцию. С подставленными коэффициентами, уравнение (4) имеет вид (13)–(14).

Для остова МЭС:

$$y_1 = 0,353 - 0,093 \cdot x_1 - 0,011 \cdot x_2 - 0,164 \cdot x_3 + 0,055 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,079 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ +0,030 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,034 \cdot x_1^2 - 0,009 \cdot x_2^2 + 0,208 \cdot x_3^2 . \quad (13)$$

Для кабины МЭС:

$$y_2 = 0,591 - 0,003 \cdot x_1 + 0,007 \cdot x_2 - 0,111 \cdot x_3 - 0,283 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,015 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ -0,007 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,135 \cdot x_1^2 - 0,133 \cdot x_2^2 - 0,296 \cdot x_3^2 . \quad (14)$$

Для навесного орудия МЭС:

$$y_3 = 0,039 - 0,383 \cdot x_1 - 0,039 \cdot x_2 - 0,373 \cdot x_3 + 0,065 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,054 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ +0,024 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,325 \cdot x_1^2 - 0,100 \cdot x_2^2 + 0,332 \cdot x_3^2 . \quad (15)$$

Для выработки оптимального управления имитационным стендом полученные уравнения следует применять при разработке программного обеспечения. Эти уравнения показывают не только оптимальные параметры, но и закономерности изменения упруго-демпфирующих характеристик в системе подрессоривания сельскохозяйственных колёсных МЭС тягового класса 2,0–3,0. Знания о параметрах работы позволяют выработать законы адаптивного регулирования в зависимости от изменений опорной поверхности. По совокупности полученных моделей (уравнения (13)–(15)), оптимальное управление стендом будет сформировано для решения поставленной задачи — минимизация уровня вибрации (уровня перемещений, скорости и ускорений) передаваемых, через систему подрессоривания, на остов машины, посредством выбора оптимального управления адаптивной системы подрессоривания.

ВЫВОДЫ

Для оптимального управления имитационным стендом были определены функциональные зависимости упруго-демпфирующих характеристик адаптивной системы подрессоривания колёсного МЭС от скорости движения и высоты неровностей опорной поверхности. Проведённые исследования по разработке оптимальных рабочих условий системы управления имитационным стендом, минимизации колебаний, прогнозированию поведения системы в различных условиях и режимах эксплуатации позволяют сделать следующие выводы.

Уравнения регрессии имеют доверительную вероятность 95%, и показывают связи между независимыми переменными, такими как скорость, высота микропрофиля и жёсткость подвески.

Параметры, полученные в результате расчётов, имеют следующие значения:

1. коэффициент изменения ускорений для навесной сельскохозяйственной машины — параметр $K_{2\text{дин}} = 0,077$, при этом жёсткость пневмоэлемента подвески переднего моста трактора составляет $C_{p1} = 243573$ Н/м, при скорости движения $V_{tr} = 4,04$ м/с, при этом высота неровности микропрофиля $H_1 = 0,022$ м;
2. коэффициенты изменения ускорений для центра масс остова — параметр $K_{1\text{дин}} = 0,278$, при этом жёсткость пневмоэлемента подвески переднего моста трактора составляет $C_{p1} = 539324$ Н/м, при скорости движения $V_{tr} = 1,67$ м/с, при этом высота неровности микропрофиля $H_1 = 0,032$ м;
3. коэффициент интенсивности для кабины — $K_{\text{инт}} = 0,599$, при этом жёсткость пневмоэлемента подвески переднего моста трактора составляет $C_{p1} = 961899$ Н/м, при скорости движения $V_{tr} = 2,30$ м/с, при этом высота неровности микропрофиля $H_1 = 0,018$ м.

Полученные уравнения и результаты необходимы для разработки программного обеспечения и выбора характеристик имитационного стенда по испытаниям адаптивных систем подрессоривания сельскохозяйственных колёсных МЭС тягового класса 2,0–3,0.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. З.А. Годжаев — общая руководство и систематизация исследований, корректировка текста статьи; С.Е. Сенькевич — постановка задачи, планирование и проведение расчётно-экспериментальных исследований, сбор и анализ литературных источников,

написание текста и редактирование статьи; Е.Н. Ильченко — проведение расчётов, подготовка и написание текста статьи; И.С. Малахов — сбор и анализ литературных источников, оформление текста и редактирование статьи, переписка с редакцией журнала; С.Ю. Уютов — сбор литературных источников, редактирование статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда — Соглашение № 23-29-00289, от 13.01.2023, https://rscf.ru/project/23-29-00289/.

Благодарность. Авторы выражают благодарность рецензентам, за ценные комментарии и замечания, способствовавшие улучшению нашей статьи для публикации в журнале.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. Z.A. Godzhaev — general management and systematization of the research, editing the text of the manuscript; S.E. Senkevich — task formulation, planning and carrying out computational and experimental studies, collecting and analyzing literature sources, writing and editing the text of the manuscript; E.N. Ilchenko — performing calculations, preparation and writing of the text of the manuscript; I.S. Malakhov — collection and analysis of literary sources, writing and editing the text of the manuscript; S.Y. Uyutov — collecting literature sources— editing the text of the manuscript. The authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors made significant contributions to the development of the concept, conduct of the research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The study was funded with the grant of the Russian Scientific Foundation — Agreement № 23-29-00289, from 13.01.2023 https://rscf.ru/project/23-29-00289/.

Acknowledgment. The authors would like to thank the reviewers for their valuable comments and suggestions that helped improve our article for publication in the journal.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А.Б., Жеглов Л.Ф. Математическая модель движения полноприводной колёсной машины по дороге с твёрдой неровной поверхностью // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. doi: 10.7463/1113.0645575

2. Полунгян А.А., Фоминых А.Б. Математическая модель динамики трансмиссии колёсной машины при движении по твёрдой неровной дороге // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2003. № 4. С. 15–25.

3. Жилейкин М.М. Математическая модель прямолинейного движения колёсной машины с балансирной подвеской мостов по неровностям пути // Транспортное и энергетическое машиностроение. 2016. № 1. С. 43–49. doi: 10.18698/0536-1044-2016-1-43-49

4. Pobedin A.V., Dolotov A.A., Shekhovtsov V.V. Decrease of the Vibration Load Level on the Tractor Operator Working Place by Means of Using of Vibrations Dynamic Dampers in the Cabin Suspension // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1252–1257. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.136

5. Mohammadikia R., Aliasghary M. Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 167. P. 105049. doi: 10.1016/j.compag.2019.105049

6. Ramon H., De Baerdemaeker J. A modelling procedure for linearized motions of tree structured multibodies-2: Design of an active spray boom suspension on a spraying-machine // Computers & Structures. 1996. Vol. 59, N. 2. P. 361–375. doi: 10.1016/0045-7949(95)00247-2

7. Shen-Lung Tung, Yau-Tarng Juang, Wei-Hsun Lee, et al. Optimization of the exponential stabilization problem in active suspension system using PSO // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38, N. 11. P. 14044–14051. doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.212

8. Казакова Е.М. Краткий обзор методов оптимизации на основе роя частиц // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2022. Т. 39, № 2. С. 150–174. doi: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174

9. Cleghorn C.W., Engelbrecht A.P. Particle swarm convergence: an empirical investigation. In: 2014 IEEE Congress on Evolut. Comput. (CEC). IEEE, 2014. P. 2524–2530. doi: 10.1007/978-3-319-09952-112

10. Жилейкин М.М., Федотов И.В. Алгоритм комплексного оптимального управления демпфированием в подвеске колёсных машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 8. С. 46–53. doi: 10.18698/0536-1044-2017-8-46-53

11. Ловчаков В.И., Сухинин Б.В., Сурков В.В. Оптимальное управление электротехническими объектами. Тула: ТулГУ, 2005.

12. Ивайкин В. Использование скользящих режимов в регулировании // Современные технологии автоматизации. 2006. № 1. С. 90–94.

13. Сухоруков А.В. Управление демпфирующими элементами в системе подрессоривания быстроходной гусеничной машины. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2003.

14. Жилейкин М.М., Калинин П.С., Федотов И.В. Синтез активной динамической непрерывной системы управления подвеской многоосного колёсного шасси // Труды НАМИ. 2012. № 249. С. 60–86. EDN: OZMDKF

15. Алексеев А.А. Выбор закона управления адаптивной системой подрессоривания автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 4. С. 21–25. EDN: TZVPNV

16. Олейников А.С. Разработка квазиоптимального дискретного управления жёсткостью виброзащитной системы: дисс. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. EDN: ZPLKEJ
17. Godzhaev Z., Senkevich S., Malakhov I., Uyutov S. Development of a mathematical model of the oscillatory system of agricultural mobile power equipment with attachments for the creation of their adaptive springing systems // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 413. P. 02042. EDN: YZMVZT doi: 10.1051/e3sconf/202341302042
18. Godzhaev Z., Senkevich S., Uyutov S., et al. Substantiation of the range of changes in the elastic-damping and inertial characteristics of the oscillatory system of agricultural MES with mounted technological equipment // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 84. P. 05045. EDN: HNLMOB doi: 10.1051/bioconf/20248405045
19. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Малахов И.С. и др. Исследование динамических характеристик сельскохозяйственных мобильных энергосредств с адаптивной ходовой системой. В кн.: XVI Всероссийская мульти конференция по проблемам управления (МКПУ-2023) : материалы мульти конференции. В 4 т., Волгоград, 11–15 сентября 2023 года. Т. 4. Волгоград: ВолгГТУ, 2023. С. 48–50. EDN: KQRVIT
20. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора. М.: Машиностроение. 1973.
21. Хачатуров А.А. Динамика системы дорога — шина — автомобиль – водитель. М.: Машиностроение, 1976.
22. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов М.: Машиностроение, 1981.

REFERENCES

1. Fomin AB, Zheglov LF. Matematicheskaya model dvizheniya polnoprivodnoy kolesnoy ma-shiny po doroge s tverdoy nerovnoy poverkhnostyu. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana.* 2013;11. (In Russ). doi: 10.7463/1113.0645575
2. Polungyan AA, Fominykh AB. Matematicheskaya model dinamiki transmissii kolesnoy mashiny pri dvizhenii po tverdoy nerovnoy doroge. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie.* 2003;4:15–25. (In Russ).
3. Zhileykin MM. Matematicheskaya model pryamolineynogo dvizheniya kolesnoy mashiny s ba-lansirnoy podveskoy mostov po nerovnostyam puti. *Transportnoe i energeticheskoe mashinostroenie.* 2016;1:43–49. (In Russ). doi: 10.18698/0536-1044-2016-1-43-49
4. Pobedin AV, Dolotov AA, Shekhovtsov VV. Decrease of the Vibration Load Level on the Tractor Operator Working Place by Means of Using of Vibrations Dynamic Dampers in the Cabin Suspension. *Procedia Engineering.* 2016;150:1252–1257. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.136
5. Mohammadikia R, Aliasghary M. Design of an interval type-2 fractional order fuzzy controller for a tractor active suspension system. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2019;167:105049. doi: 10.1016/j.compag.2019.105049
6. Ramon H, De Baerdemaeker J. A modelling procedure for linearized motions of tree structured multibodies-2: Design of an active spray boom suspension on a spraying-machine. *Computers & Structures.* 1996;59(2):361–375. doi: 10.1016/0045-7949(95)00247-2
7. Shen-Lung Tung, Yau-Tarng Juang, Wei-Hsun Lee, et al. Optimization of the exponential stabilization problem in active suspension system using PSO. *Expert Systems with Applications.* 2011;38(11):14044–14051. doi: 10.1016/j.eswa.2011.04.212
8. Kazakova EM. Kratkiy obzor metodov optimizatsii na osnove roya chastits. *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki.* 2022;39(2):150–174. (In Russ). doi: 10.26117/2079-6641-2022-39-2-150-174
9. Cleghorn CW, Engelbrecht AP. Particle swarm convergence: an empirical investigation. In: *2014 IEEE Congress on Evolut. Comput. (CEC).* IEEE, 2014:2524–2530. doi: 10.1007/978-3-319-09952-112
10. Zhileykin MM, Fedotov IV. Algoritm kompleksnogo optimalnogo upravleniya dempfirovaniem v podveske kolesnykh mashin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie.* 2017;8:46–53. (In Russ). doi: 10.18698/0536-1044-2017-8-46-53
11. Lovchakov VI, Sukhinin BV, Surkov VV. *Optimalnoe upravlenie elektrotekhnicheskimi obektami.* Tula: TulGU; 2005. (In Russ).
12. Ivaykin V. Ispolzovanie skolzyashchikh rezhimov v regulirovanii. *Sovremennye tekhnolo-gii avtomatizatsii.* 2006;1:90–94. (In Russ).
13. Sukhorukov AV. Upravlenie dempfiruyushchimi elementami v sisteme podressorivaniya bystrokhodnoy gusenichnoy mashiny. [dissertation] Moscow; 2003. (In Russ).
14. Zhileykin MM, Kalinin PS, Fedotov IV. Sintez aktivnoy dinamicheskoy nepreryvnoy sistemy upravleniya podveskoy mnogoosnogo kolesnogo shassi. *Trudy NAMI.* 2012;249:60–86. (In Russ). EDN: OZMDKF
15. Alekseev AA. Vybor zakona upravleniya adaptivnoy sistemoy podressorivaniya avtomobilya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie.* 2007;4:21–25. (In Russ). EDN: TZVPNV
16. Oleynikov AS. Razrabotka kvazioptimalnogo diskretnogo upravleniya zhestkostyu vibro-zashchitnoy sistemy: [dissertation] Volgograd; 2014. (In Russ). EDN: ZPLKEJ
17. Godzhaev Z, Senkevich S, Malakhov I, Uyutov S. Development of a mathematical model of the oscillatory system of agricultural mobile power equipment with attachments for the creation of their adaptive springing systems. *E3S Web of Conferences.* 2023;413:02042. (In Russ). EDN: YZMVZT doi: 10.1051/e3sconf/202341302042
18. Godzhaev Z, Senkevich S, Uyutov S, et al. Substantiation of the range of changes in the elastic-damping and inertial characteristics of the oscillatory system of agricultural MES with mounted technological equipment. *BIO Web of Conferences.* 2024;84:05045. (In Russ). EDN: HNLMOB doi: 10.1051/bioconf/20248405045
19. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Malakhov IS, et al. Issledovanie dinamicheskikh kharakteri-stik selskokhozyaystvennykh mobilnykh energosredstv s adaptivnoy khodovoy sistemoy. In.: *XVI Vserossiyskaya multi konferentsiya po problemam upravleniya (MKPU-2023) : materialy multi konferentsii. V 4 t., Volgograd, 11–15 sentyabrya 2023 goda.* Volgograd: VolgGTU; 2023;4:48–50. (In Russ). EDN: KQRVIT
20. Barskiy IB, Anilovich VYa, Kutkov GM. Dinamika traktora. Moscow: Mashinostroenie; 1973. (In Russ).

21. Khachaturov AA. Dinamika sistemy doroga — shina — avtomobil — voditel. Moscow: Mashinostroenie; 1976. (In Russ).

22. Spiridonov AA. Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov. Moscow: Mashinostroenie; 1981. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

*** Малахов Иван Сергеевич,**
младший научный сотрудник сектора «Моделирование и оптимизация МЭС»;
адрес: Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malahovivan2008@mail.ru

Годжаев Захид Адыгезалович,
чл.-корр. РАН, профессор,
доктор технических наук,
заведующий отделом «Мобильные энергосредства»;
ORCID: 0000-0002-1665-3730;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

Сенькевич Сергей Евгеньевич,
доцент, канд. техн. наук,
заведующий лабораторией «Автоматизированный привод сельскохозяйственной техники»; старший научный сотрудник;
ORCID: 0000-0001-6354-7220;
eLibrary SPIN: 7766-6626;
e-mail: sergej_senkevich@mail.ru

Ильченко Екатерина Николаевна,
инженер лаборатории «Автоматизированный привод сельскохозяйственной техники»;
ORCID: 0009-0005-3901-5706;
eLibrary SPIN: 5672-1313;
e-mail: kat-sama@mail.ru

Уютов Сергей Юрьевич,
младший научный сотрудник лаборатории «Автоматизированный привод сельскохозяйственной техники»;
ORCID: 0000-0001-9394-5916;
eLibrary SPIN: 7350-1489;
e-mail: s_uyutov@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Ivan S. Malakhov,**
Junior Researcher of the Modeling and Optimization of MPU Sector;
address: 5 1st Institutskiy proezd, 109428 Moscow, Russian Federation;
ORCID: 0000-0001-8162-7718;
eLibrary SPIN: 7067-6972;
e-mail: malahovivan2008@mail.ru

Zakhid A. Godzhaev,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Dr. Sci. (Engineering),
Head of the Mobile Energy Units Department;
ORCID: 0000-0002-1665-3730;
eLibrary SPIN: 1892-8405;
e-mail: fic51@mail.ru

Sergey E. Senkevich,
Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering),
Head of the Automated Drive of Agricultural Machinery Laboratory; Senior Researcher;
ORCID: 0000-0001-6354-7220;
eLibrary SPIN: 7766-6626;
e-mail: sergej_senkevich@mail.ru

Ekaterina N. Ilchenko,
Engineer of the Automated Drive of Agricultural Machinery Laboratory;
ORCID: 0009-0005-3901-5706;
eLibrary SPIN: 5672-1313;
e-mail: kat-sama@mail.ru

Sergey Yu. Uyutov,
Junior Researcher of the Automated Drive of Agricultural Machinery Laboratory;
ORCID: 0000-0001-9394-5916;
eLibrary SPIN: 7350-1489;
e-mail: s_uyutov@mail.ru