

УДК 630*22

UDC 630*22

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОРНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСОСЕЧНЫХ МАШИН**

**MODELING SUPPORT SURFACE FORESTRY
MACHINES**

Ласточкин Денис Михайлович
к.т.н.
*Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Lastochkin Denis Mikhailovich
Cand.Tech.Sci.
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,
Russia*

Москалева Светлана Александровна
к.г.н., доцент

Moskaleva Svetlana Alexandrovna
Cand.Geogr.Sci., associate professor

Ларина Алена Викторовна
к.г.н., доцент
*Мордовский государственный университет им.
Н.П. Огарёва, Саранск, Россия*

Larina Alena Viktorovna
Cand.Geogr.Sci., associate professor
Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Мучкаева Галина Мацаковна
к.с.-х.н., доцент
*Калмыцкий государственный университет,
Элиста, Россия*

Muchkaeva Galina Matsakovna
Cand.Agr.Sci., associate professor
Kalmyk State University, Elista, Russia

В работе представлены подходы к моделированию микропрофиля лесосеки как опорной поверхности лесосечных машин и приведен пример использования полученной модели при исследовании поведения колесной машины на неровной опорной поверхности

The article presents the approach to modeling of microprofile felling areas as the bearing surface of harvesting machines and is an example of the model obtained in the study of the behavior of wheeled vehicle on uneven support surface

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, ЛЕСОСЕКА, ЛЕСОСЕЧНАЯ МАШИНА, ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАБОТЫ

Keywords: MODELING, SUPPORT SURFACE, CUTTING AREAS, FORESTRY MACHINE, FORESTRY WORK

Введение

При транспортировке и других операциях по заготовке леса движение колесных лесосечных машин по лесосеке протекает под воздействием многочисленных и разнообразных факторов, среди которых можно выделить неровности опорных поверхностей.

Так как неровность опорных поверхностей лесосечных машин является основным источником непрерывных колебаний подрессоренных и неподрессоренных масс, амплитуды и ускорения которых иногда достигают значительных размеров, при проектировании и проведении доводочных испытаний систем подрессоривания колесных лесосечных машин необходимо иметь стабильные характеристики лесных опорных поверхностей или их известное изменение [1].

Однако практика проектирования новых лесосечных машин показывает, что, несмотря на обилие сведений о неровностях лесных волоков, сведения о геометрических характеристиках непосредственно микрорельефа лесосеки практически отсутствуют [2]. Этот недостаток при проектировании можно устранить путем математического моделирования профиля неровностей естественной поверхности лесосеки как опорной поверхности лесосечных машин.

Такой подход позволяет ускорить исследование динамических свойств лесосечных машин при их проектировании и проведении доводочных испытаний.

Математическое моделирование

Задачей математического моделирования микрорельефа поверхности лесосеки является построение кривой профиля лесосеки с заданной корреляцией и дисперсией процесса. Использование таких данных в качестве входного воздействия даёт возможность исследовать поведение системы не по отношению к какому-либо одному воздействию, а по отношению к целой совокупности возможных случайных воздействий.

Совокупность неровностей, характеризуемая случайными значениями вдоль оси движения лесосечной машины, формирует микрорельеф. При плавном очертании неровности её профиль рассматривают синусоидальным, поэтому при математическом моделировании на современном уровне используются возможности статистического метода, который дополняет вероятностные методы исследования динамических систем. При статистическом методе изучения случайных функций используют не свойства каждой из функций, а свойства всего множества функций в целом.

При математическом моделировании был принят ряд допущений: микрорельеф лесосеки является случайной функцией протяженности пути;

ординаты микропрофиля подчиняются нормальному закону распределения; длины неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; микропрофиль меняется случайным образом только в вертикальной и продольной плоскостях пути.

Цель моделирования случайного микропрофиля лесной опорной поверхности заключается в получении преобразующего выражения, которое при подаче на вход сигнала типа «белый шум» преобразовывало бы его в случайный процесс с заданными характеристиками.

Работу преобразующего выражения можно представить в виде структурной схемы (рис. 1):

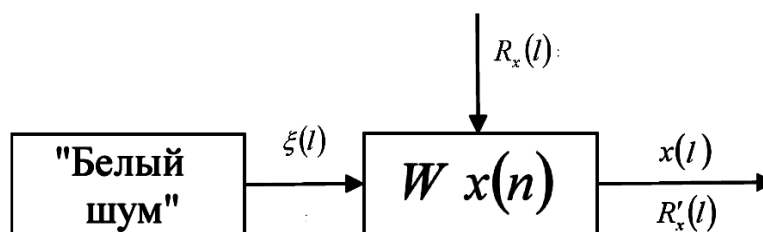


Рисунок 1 – Структурная схема преобразующего выражения

где $\xi(l)$ – «белый шум», $R_x(l)$ – корреляционная функция; $x(l)$ – смоделированный случайный процесс, $R'_x(l)$ – корреляционная функция смоделированного микропрофиля; $x(n)$ – преобразующее выражение.

В качестве модели микропрофиля лесосеки была принята модель гауссовского случайного процесса (многомерная плотность распределения, вероятности которых описываются гауссовским законом) с экспоненциальной функцией корреляции вида:

$$R(m) = D \exp(-am), \quad (1)$$

где D - дисперсия процесса, a - определяет корреляцию (статистическую зависимость) соседних чисел ($a > 0$).

Сперва необходимо получить реализацию дискретного «белого шума» длительностью N (где N достаточно большое, порядка 1000 и более отсчетов) с заданной дисперсией и математическим ожиданием.

Для стационарного процесса берется единичная дисперсия D с нулевым математическим ожиданием $M(x)$, а для нестационарного процесса задается разброс данной случайной величины дисперсии:

$$D = h_n + \exp(h_{n-1} \Delta t), \quad (2)$$

с математическим ожиданием вида:

$$M(x) = h_n + h_{n-1} \sin \Delta t. \quad (3)$$

Для получения данной реализации необходимо N раз обратиться к датчику, выдающему независимые случайные числа, распределенные по гауссовскому закону.

Для моделирования гауссовского случайного процесса с экспоненциальной функцией корреляции используется следующий алгоритм:

$$x(n) = k_1 e(n) + k_2 x(n-1), \quad (4)$$

где коэффициент $k_1 = \sqrt{D(1-k_2^2)}$, $e(n)$ – значения дискретного гауссовского «белого шума».

Параметрами модели в данном случае являются дисперсия выходного моделируемого процесса D и параметр a , который определяет статистическую связь соседних случайных отсчетов.

Коэффициент k_2 – нормированный коэффициент корреляции, является исходным параметром, который определяет нормированную корреляцию соседних отсчетов случайного процесса и практически задается из интервала от 0.9 до 0.9999. Когда этот коэффициент равен 1, то все значения случайного процесса становятся одинаковыми, а когда этот коэффициент стремится к 0, то получается модель дискретного гауссовского «белого шума».

В результате моделирования гауссовского случайного процесса появилась возможность построить кривую профиля микрорельефа

лесосеки с заданной корреляцией и дисперсией процесса. Пример моделирования микропрофиля поверхности лесосеки для нестационарного процесса в программе MS Excel с фрагментом исходных данных представлен в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 - Фрагмент исходных данных для математического моделирования микрорельефа поверхности лесосеки

	Случ. велич-а, [0;1], F	Среднее знач., T _{ср}	Случ. велич-а, T(F)	Дискр. «белый шум»	Время, t	Матем. ожид-е, X _{ср}	Дисп-я, D	Кэфф. k1	Реализ. случ-ого процесса X _n
1.	0,502971	0	0,007447	-0,9883	0,01	35,149	12,0420	0,6905	-3,847296
2.	0,049811		-1,64668	-0,4778	0,05	35,749	12,2118	0,6954	-3,572204
3.	0,095987	Станд-е откл-е, σ	-1,30475	0,46415	0,09	36,348	12,3840	0,7002	-3,137866
4.	0,118260	1	-1,18372	0,65200	0,13	36,944	12,5586	0,7052	-3,723109
5.	0,726343		0,601790	-1,0288	0,17	37,537	12,7356	0,7101	-3,774973
6.	0,647579	Кэфф. k2	0,378792	0,36478	0,21	38,126	12,9152	0,7151	-3,520622
7.	0,849888	0,98	1,035956	0,13563	0,25	38,711	13,0973	0,7201	-4,311895
8.	0,841195		0,999382	1,01580	0,29	39,289	13,2819	0,7252	-2,187823
9.	0,943033	Первое значение	1,580757	-1,7981	0,33	39,860	13,4692	0,7303	-2,468829
10.	0,604874	-4,07721	0,265984	-1,0691	0,37	40,424	13,6591	0,7354	-3,242835
11.	0,233481	35	-0,72742	-0,3011	0,41	40,979	13,8516	0,7406	-2,504527
12.	0,469362	15	-0,07687	0,03458	0,45	41,524	14,0469	0,7458	-2,924229
13.	0,232248	12	-0,73146	-0,6733	0,49	42,059	14,2450	0,7510	-2,848339
14.	0,489380	0,35	-0,02662	3,18912	0,53	42,583	14,4458	0,7563	-3,604291
15.	0,761293		0,710468	-0,2390	0,57	43,0948	14,6495	0,7616	-3,106050
16.	0,579150		0,199719	0,54652	0,61	43,5930	14,8560	0,7670	-2,299789
17.	0,686350		0,485532	-0,6579	0,65	44,0777	15,0654	0,7723	-1,661795
18.	0,032513		-1,84506	0,28638	0,69	44,5480	15,2778	0,7778	-1,566995
19.	0,108769		-1,23309	-1,6433	0,73	45,0030	15,4932	0,7832	-1,191089
20.	0,836992		0,982170	-1,3104	0,77	45,4420	15,7117	0,7887	-1,795884
21.	0,998621		2,993715	-1,6853	0,81	45,8643	15,9332	0,7943	-1,506544
22.	0,227584		-0,74682	-1,1066	0,85	46,2692	16,1578	0,7999	-2,230271
23.	0,528396		0,071240	-0,4107	0,89	46,6560	16,3856	0,8055	-2,148211
24.	0,683969		0,478828	0,98273	0,93	47,0242	16,6166	0,8111	-3,135703
25.	0,389813		-0,27980	0,85653	0,97	47,3732	16,8509	0,8168	-3,471186

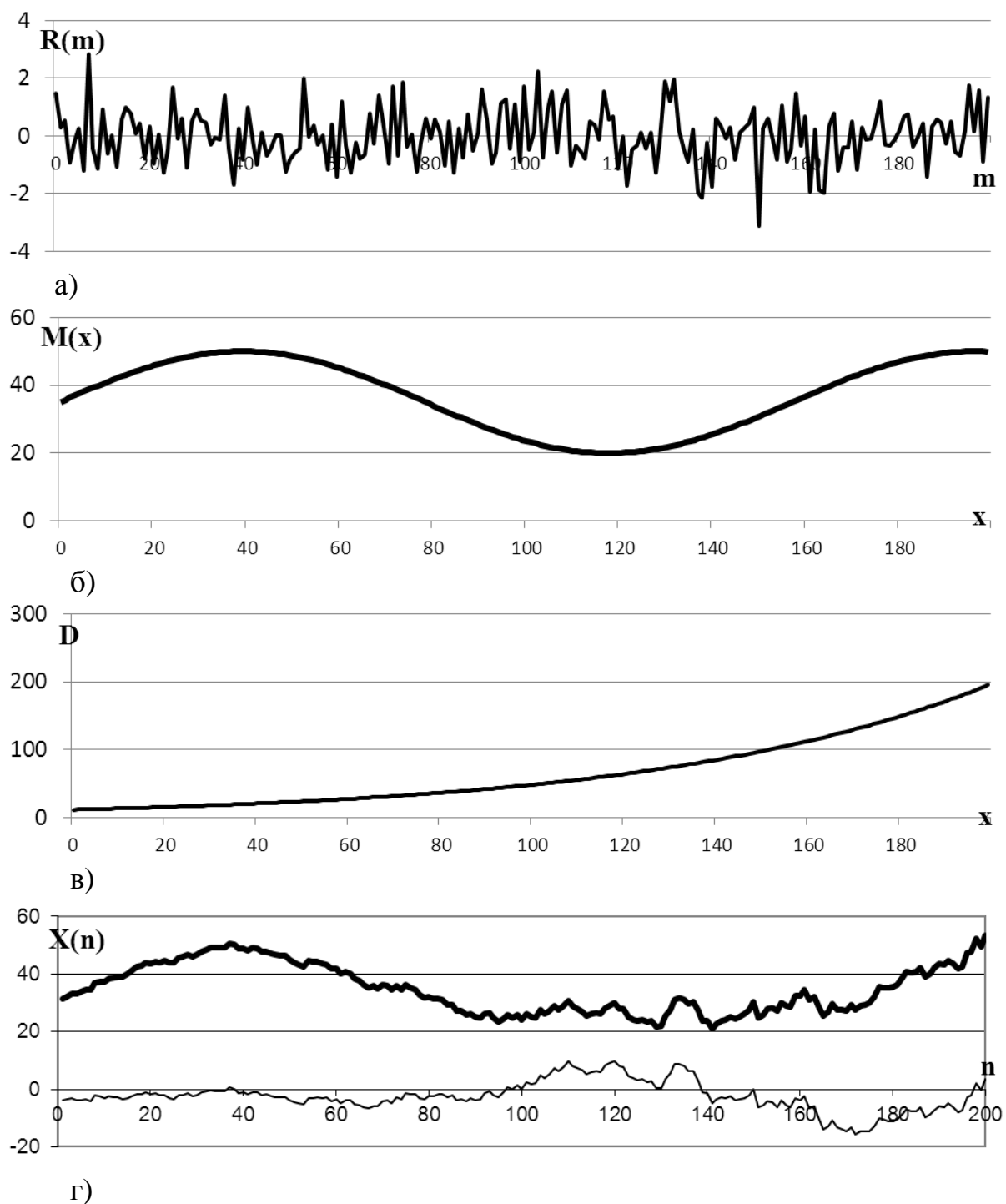


Рисунок 2 - Результаты моделирования микропрофиля поверхности лесосеки (нестационарный процесс):

а – случайная функция типа «белый шум»; б – среднее значение ординат микропрофиля; в – среднее квадратичное отклонение ординат; г – смоделированный случайный нестационарный процесс (нижняя линия) с поправкой на математическое ожидание (верхняя линия)

Разработанная математическая модель микропрофиля лесосеки позволяет использовать ее при проведении анализа динамики лесосечной машины при действии неровностей микрорельефа лесосеки. В качестве примера применения полученной математической модели можно рассмотреть статистический анализ геометрической закономерности изменения углов наклона колесной платформы, представляющей лесную машину при взаимодействии с неровностями опорной поверхности лесосеки.

За основу платформы была взята трёхопорная система (рис. 3), обладающая преимуществом простоты (нет неопределенной четвертой точки опоры). Приняли, что платформа несет на себе захватно-срезающее устройство, и своим ходом вывозит срезанное дерево из лесосеки. Подобная лесозаготовительная машина приведена в работе [3], а сама машина представлена на рисунке 4.

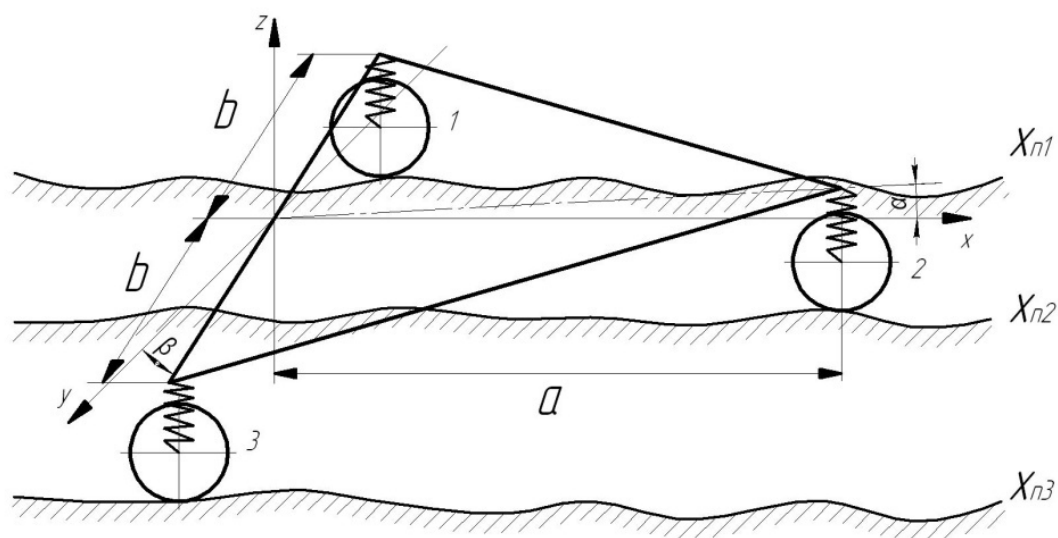


Рисунок 3 - Расчетная схема нахождения трехколесной платформы на микропрофиле лесной опорной поверхности

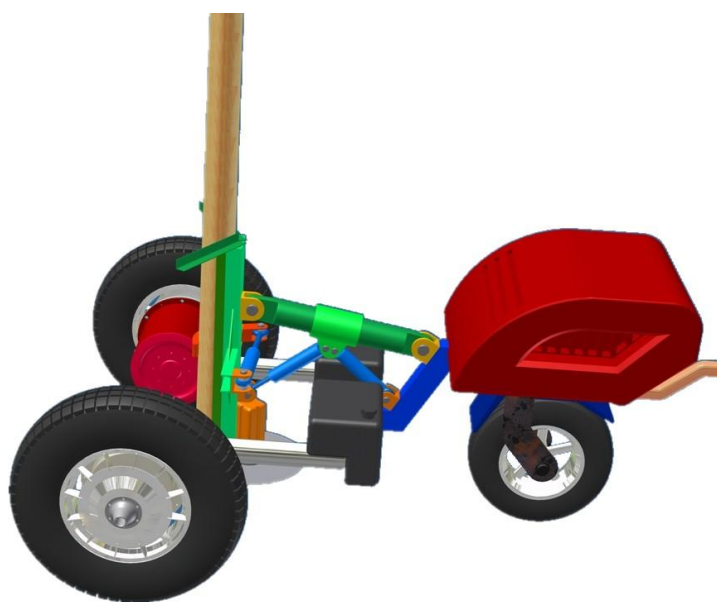


Рисунок 4 - Прототип лесозаготовительной машины на трехколесной платформе

Под колесами 1,2,3 моделировалась неровность лесосеки X_{n1}, X_{n2}, X_{n3} , задавая геометрические параметры межосевого расстояния a и ширины колеи b , исходя из расчетной схемы (рисунок 4) можно выразить формулы статических углов наклона трехколесной платформы:

наклон в продольной плоскости

$$\alpha = \frac{\arcsin(h(x_{n1}) - (h(x_{n2}) + h(x_{n3})))}{2a}, \quad (5)$$

наклон в поперечной плоскости

$$\beta = \frac{\arcsin(h(x_{n2}) - h(x_{n3}))}{2b}. \quad (6)$$

Основными параметрами варьирования приняты межосевое расстояние a , ширина колеи b и дисперсия D модели микрорельефа лесосеки, которые более полно характеризуют микрорельеф лесосеки. Фрагмент исходных данных для определения углов наклона трехколесной платформы на математической модели микрорельефа поверхности лесосеки представлен в таблице 3.

Таблица 2 - Фрагмент исходных данных для определения углов наклона трехколесной платформы на математической модели микропрофиля поверхности лесосеки

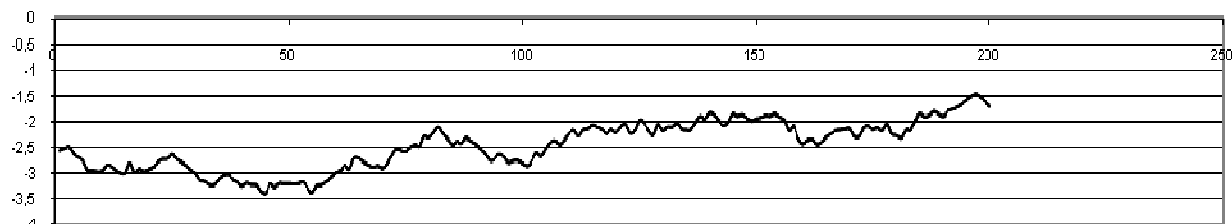
	Реализ-я случ-го процесса, X_{n1}	Реализ-я случ-го процесса, X_{n2}	Реализ-я случ-го процесса, X_{n3}	2b	a	Продол. наклон, α	Попер. наклон, β	α , град	β , град
1	-8,52584	-10,2328	15,43514	200	250	-0,044522	-0,12869	-2,550	-7,373
2	-8,54802	-10,0533	14,82135			-0,043742	-0,12469	-2,506	-7,144
3	-8,24971	-9,83016	14,98722			-0,043326	-0,12440	-2,482	-7,128
4	-8,76492	-9,91294	15,24038			-0,045730	-0,12610	-2,620	-7,225
5	-8,81009	-9,80347	15,60196			-0,046854	-0,12737	-2,684	-7,297
6	-9,14620	-9,83149	15,43722			-0,047814	-0,12668	-2,739	-7,258
7	-9,53375	-9,26659	15,67741			-0,050978	-0,12504	-2,920	-7,164
8	-9,63230	-9,29278	15,60836			-0,051182	-0,12482	-2,932	-7,152
9	-9,70558	-9,21199	15,50506			-0,051431	-0,12390	-2,946	-7,099
10	-9,31960	-9,05797	16,08243			-0,051349	-0,12603	-2,942	-7,221
11	-9,05992	-8,76107	15,36378			-0,049465	-0,12091	-2,834	-6,928
12	-9,19239	-8,90114	15,42258			-0,049833	-0,12192	-2,855	-6,985
13	-9,18523	-8,67951	15,92500			-0,051254	-0,12333	-2,936	-7,066
14	-9,35467	-8,53790	15,77592			-0,051918	-0,12187	-2,974	-6,982
15	-9,76941	-9,03739	15,56744			-0,052161	-0,12333	-2,988	-7,066
16	-9,29158	-9,31895	15,07336			-0,048694	-0,12226	-2,789	-7,005
17	-9,82664	-9,13778	15,36186			-0,051777	-0,12280	-2,966	-7,036
18	-9,27313	-8,64601	15,40909			-0,050640	-0,12056	-2,901	-6,908
19	-9,48835	-8,67439	15,44954			-0,051526	-0,12091	-2,952	-6,927
20	-9,37200	-8,38973	15,02504			-0,050780	-0,11734	-2,909	-6,723
21	-9,565887	-9,159927	15,00281			-0,049970	-0,12110	-2,863	-6,939
22	-9,334775	-9,236846	14,84015			-0,048564	-0,12067	-2,782	-6,914
23	-9,076202	-9,338432	14,86627			-0,047378	-0,12132	-2,714	-6,951
...	-8,813450	-9,146538	15,20078			-0,047380	-0,12203	-2,714	-6,992

Варьирование входных параметров, принятых при проведении вычислительного эксперимента, приведено в таблице 3.

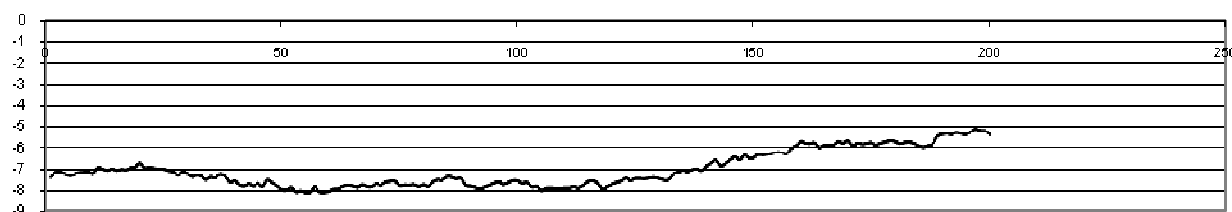
Таблица 3 - Значения варьируемых входных параметров

№	Значения входных параметров		
	<i>a, см</i>	<i>b, см</i>	<i>D, см²</i>
1	150	150	1
2	180	180	10
3	210	210	20
4	240	240	30
5	270	270	40
6	300	300	50

На рисунке 5 представлены результаты вычислительных экспериментов в 36-ти точках факторного пространства.



а)



б)

Рисунок 5 - Результаты вычислений углов наклона трехколесной платформы на смоделированном случайном микрорельефе лесосеки:
а и б – углы наклона платформы в продольной и поперечной плоскостях (в градусах от пройденного пути в метрах)

Статическая обработка результатов проводилась в пакете прикладных программ MS Excel путем множественного регрессионного анализа по методике определения вида нелинейной функции по параметрам многофакторного пространства (табл. 4).

Задача регрессионного анализа заключается в экспериментальном определении коэффициентов регрессии путем наблюдения за характером изменения входных параметров (габаритных параметров платформы и дисперсии модели неровности) и выходной величины (угла наклона платформы).

В результате регрессионного анализа воздействия смоделированных неровностей на трехколесную платформу определили углы наклона платформы в продольных (рис. 6) и поперечных плоскостях (рис. 7).

Таблица 4 - Результаты определения углов наклона трехколесной платформы на смоделированном случайном микрорельефе лесосеки

№ опыта	Входные параметры			Выходные параметры	
	D, см ²	a, см	b, см	α max, град	β max, град
1.	1	150	150	0,94	1,26
2.	1	180	180	0,78	1,17
3.	1	210	210	0,67	0,98
4.	1	240	240	0,59	0,83
5.	1	270	270	0,52	0,72
6.	1	300	300	0,47	0,71
7.	10	150	150	6,96	4,56
8.	10	180	180	5,79	3,75
9.	10	210	210	4,96	3,56
10.	10	240	240	4,34	2,89
11.	10	270	270	3,86	2,46
12.	10	300	300	3,47	2,24
13.	20	150	150	3,57	3,57
14.	20	180	180	2,97	2,97
15.	20	210	210	2,55	2,55
16.	20	240	240	2,23	2,23
17.	20	270	270	1,98	1,98
18.	20	300	300	1,78	1,78
19.	30	150	150	6,00	7,10
20.	30	180	180	5,00	5,87
21.	30	210	210	4,28	4,88
22.	30	240	240	3,75	3,95
23.	30	270	270	3,33	3,63
24.	30	300	300	3,00	3,16
25.	40	150	150	6,16	8,96
26.	40	180	180	5,13	7,53
27.	40	210	210	4,39	6,69
28.	40	240	240	3,84	5,88
29.	40	270	270	3,42	5,45
30.	40	300	300	3,07	4,77
31.	50	150	150	8,84	11,37
32.	50	180	180	7,36	9,26
33.	50	210	210	6,30	8,10
34.	50	240	240	5,51	6,91
35.	50	270	270	4,90	6,20
36.	50	300	300	4,41	5,61

Из таблицы видно, что при габаритных параметрах платформы ($a = 250$ см, $b = 200$ см) и при высоте микрорельефа поверхности лесосеки до 20 см, углы наклона α не более 5 градусов, а углы наклона β не более 10 градусов.

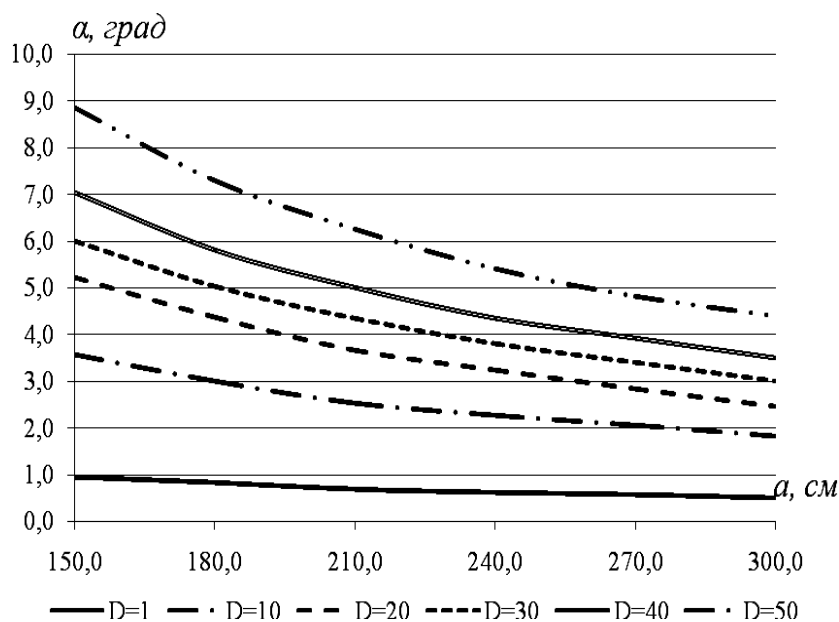


Рисунок 6 - Зависимость угла α от варьируемых параметров межосевого расстояния платформы a (150;300) и дисперсии неровности смоделированной опорной поверхности D (1;50)

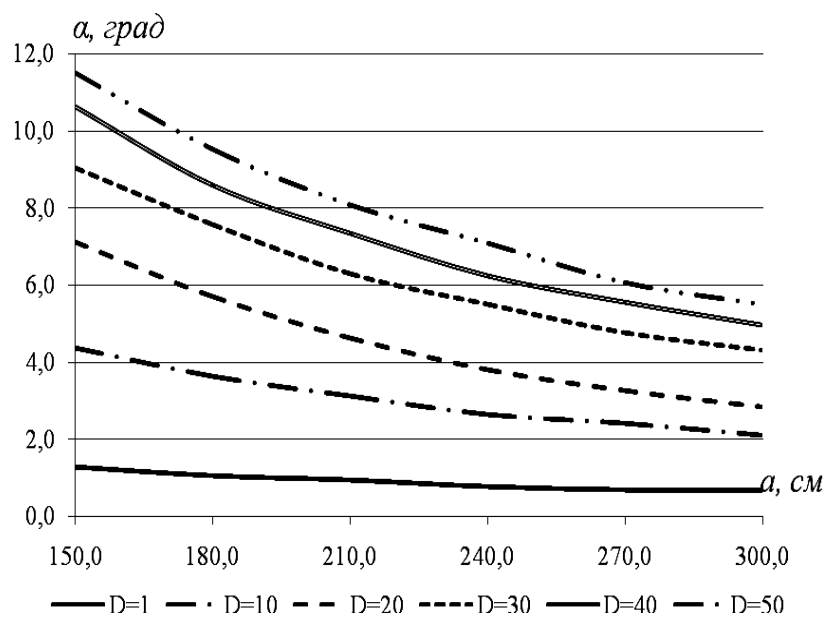


Рисунок 7 - Зависимость угла β варьируемых параметров ширины платформы b (150;300) и дисперсии неровности смоделированной опорной поверхности D (1;50)

Анализ данных позволил получить следующие модели зависимости угла наклона платформы от геометрических параметров машины:

$$\text{Для угла } \alpha: y = \frac{1}{5,0008 + 0,1022 \cdot x_1 + 0,01719 \cdot x_2}, r = 0,910;$$

$$\text{Для угла } \beta: y = \frac{1}{7,0347 + 0,2739 \cdot x_1 + 0,02197 \cdot x_2}, r = 0,916.$$

Уравнение регрессии показывает (например, для угла α), что при увеличении дисперсии неровности на 1 единицу (при неизменных габаритных параметрах платформы) изменение угла произойдет на 0.1 градус, а при увеличении габаритных параметров платформы (при неизменной дисперсии микронеровности) угол наклона изменится на 0,017 градусов. Коэффициент детерминации $r > 0,90$ говорит об удовлетворительной аппроксимации (модель в целом адекватна описываемому явлению).

Выводы

Разработанная математическая модель микрорельефа лесосеки позволяет с помощью полученных уравнений регрессии статических геометрических закономерностей изменения углов наклона шасси машины использовать ее при моделировании работы лесных машин для получения, например, ее динамических характеристик.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.2096.

Список литературы

1. Александров, В. А. Моделирование взаимодействия лесных машин с предметом труда и внешней средой [Текст] : учеб. пособие для студентов лесомеханического факультета / В. А. Александров. – Л.: ЛТА, 1987. – 84 с.
2. Анисимов, Г. М. Прогнозирование скорости движения модульного трактора по микронеровностям волока [Текст] / Г. М. Анисимов, М. Ф. Семёнов, А. А. Лысоченко // Обоснование параметров машин и механизмов для лесозаготовок и лесного хозяйства. – Л. : ЛТА, 1990. – С. 14–18.
3. Сидыганов, Ю.Н. Математическое моделирование работы малогабаритной валочно-пакетирующей машины / Ю.Н. Сидыганов, Е.М. Онучин, Д.М. Ласточкин, А.В. Шемякин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии: Вып.185. СПб.: СПбЛТА, 2008. С. 123-133.