

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630*372/375

*И. В. Григорьев, М. В. Цыгарова,
А. И. Жукова, Д. В. Лепилин, Г. Ю. Есин*

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРЕЛЕВОЧНОЙ СИСТЕМЫ С ВОЛОКОМ

На основании математической теории планирования эксперимента и статистической динамики обоснован план проведения экспериментальных исследований взаимодействия трелевочной системы с волоком в производственных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: *трелевочный трактор, почва, микронеровности, трелевка, планирование эксперимента, статистическая динамика.*

Введение. При трелевке древесины на трелевочную систему (трактор – пачка древесины) воздействует большое число факторов, характеризующих свойства волока, деревьев, машины, значения которых изменяются в широком диапазоне [1]. Условиям эксплуатации лесосечных машин часто свойственна значительная неопределенность. Так, например, если для автомобиля опорная поверхность вполне определенное понятие – категория дороги, то трелевочный волок – полная неопределенность, так как его свойства могут изменяться в широком диапазоне в течение рабочего дня [2].

В отличие от мобильных систем, проведение исследовательских испытаний лесосечных машин в производственных условиях вызвано не только подтверждением результатов теоретических исследований, но и получением значений коэффициентов, характеризующих свойства волока и предмета труда, теоретически которые определить невозможно. Лауреат Нобелевской премии академик П.Л. Капица писал, что даже в академической науке существуют некоторые области исследований, где пока еще невозможно получить строгие теоретические решения [3]. Следовательно, в теории движения лесосечных машин и их взаимодействии с древесиной и поверхностью движения экспериментальные исследования имеют большую актуальность, и значимость их возрастает по мере совершенствования лесных машин и оборудования [4].

Число опытов при проведении исследовательских испытаний сложных систем в производственных условиях без теоретического обоснования их числа может достигать нескольких сотен [4], что часто практически выполнить невозможно, даже при больших затратах средств, энергии и времени.

Целью данной работы является оптимизация исследовательских испытаний трелевочных тракторов в производственных условиях путем определения необходимых и

достаточных числа опытов и длительности испытаний. **Объектом** исследования являются трелевочные волокна. **Предметом** исследования является процесс взаимодействия трелевочных систем с поверхностью движения.

Опыт исследований в различных отраслях машиностроения и сельском хозяйстве показывает, что применение методов планирования эксперимента позволяет:

- получить высокую эффективность исследования;
- создать математическую модель процесса;
- планировать стратегию и тактику исследования с минимизацией числа опытов, то есть управлять экспериментом.

Из большого числа факторов, влияющих на режимы работы лесосечных машин, необходимо выбрать только те, которые отвечают определенным требованиям. Факторы не должны иметь корреляционной связи, должны быть управляемы и могут быть представлены в кодированном виде.

Длительные исследования различных модификаций трелевочных тракторов и машин первичного транспорта леса [1] показали, что параметром оптимизации может быть производительность (транспортная производительность) или скорость выполнения операций как аргумент производительности.

Исследования предшественников [1, 5, 6] показали, что, например, на транспортную производительность трелевочного трактора определяющее влияние оказывают мощность двигателя (N_c) или энергонасыщенность трактора (G_N), рейсовая нагрузка (Q) и свойства трелевочного волокна, которые оцениваются коэффициентом сопротивления качению (для трелевочной системы – коэффициент сопротивления движению) (f) и уклонами (i). В теории движения мобильных систем применяется коэффициент сопротивления дороги или волокна (ψ):

$$\psi = f \pm i. \quad (1)$$

Такая замена двух коэффициентов движения трелевочной системы одним сокращает число факторов.

Связь между натуральными и кодированными значениями факторов, действующих на современные и перспективные трелевочные тракторы производства Онежского тракторного завода (ОТЗ), интервалы их варьирования (табл. 1) выбраны из реальных изменений и условий эксплуатации в Северо-Западном регионе РФ [1].

Т а б л и ц а 1

Связь между натуральными и кодированными значениями факторов, действующих на трелевочные тракторы

Кодированное обозначение фактора	Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
x_1	Рейсовая нагрузка Q , пл. м ³	5,5	7,0	8,5	1,5
x_2	Мощность двигателя N_c , кВт	59	70	81	11
x_3	Коэффициент сопротивления волока ψ	0,18	0,20	0,22	0,02

Влияние иных факторов (таких, как атмосферные осадки и давление, состояние дизеля и др.) уменьшалось путем рандомизации опытов.

После изучения априорной информации и результата многочисленных исследований тракторов ОТЗ в полигонных и производственных условиях принята математиче-

ская модель процесса в виде интерполяционного полинома первого порядка и применено ортогональное планирование:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_3x_3 + b_{1,2}x_1x_2 + b_{1,3}x_1x_3 + b_{2,3}x_2x_3, \quad (2)$$

где y – оценочный параметр, $b_{i,j}$ – постоянные коэффициенты модели.

Известно, что помимо эксплуатационной эффективности трелевочного трактора весьма значимой компонентой общего вектора эффективности его работы является экологическая эффективность, заключающаяся в степени воздействия трактора на лесную экосистему, и, прежде всего, на лесные почвогрунты [4].

Установлено [2, 4], что на степень воздействия трелевочного трактора на лесной почвогрунт значительное влияние имеет динамика трелевочной системы, которая во многом зависит от микропрофиля волока. Понятно, что лесопромышленный трактор и лесозаготовительные машины на его базе представляют собой сложную управляемую динамическую систему, функционирующую при интенсивных случайных внешних воздействиях. Для исследования влияния этого фактора наиболее предпочтительным является применение статистической динамики – одной из областей теории вероятности, позволяющей проводить расчеты динамических систем, работающих в сложных производственных условиях [7].

Движение трелевочной системы по волоку протекает под воздействием многочисленных и разнообразных факторов, среди которых можно выделить неровности опорной поверхности, для которых исследователи применяют термин «дорожные неровности», «неровности дороги», «микропрофиль дороги» [8], «неровности поверхности поля» [9], «микронеровности волока»; встречаются и другие термины, например, «микропрофиль дороги». Следует отметить, что в исследовании мобильных систем при оценке воздействия неровности пути на систему применяются термины «внешние возмущения» [9, с. 131], «случайные возбуждения» [8, с. 127], «возмущающие воздействия» [8, с. 127]. В фундаментальных исследованиях динамики системы «дорога–шины–автомобиль–водитель» применяют термин «возмущение» [10, с. 82].

Значительный вклад в изучение динамики транспортных систем под воздействием неровностей пути внесли исследователи автомобилей, следовательно, оптимизацию исследовательских испытаний трелевочных тракторов в производственных условиях целесообразно проводить, базируясь на полученных ими результатах.

Геометрические параметры неровностей и уклонов – микропрофиля дороги – определяются обычно нивелированием и графически изображаются в виде продольного профиля дороги. Профилем дороги, а следовательно, и волока, считается сечение рельефа в направлении движения мобильной системы. Каждое сечение поверхности конкретного участка является реализацией профиля, а совокупность таких реализаций представляет собой случайную функцию или случайный процесс. Рельеф дороги представляют как совокупность параллельных сечений, достаточно близко расположенных друг от друга [10]. Рельеф дороги, выраженный в функции не расстояния, а времени, А. А. Хачатуров и др. называют возмущением, сущность которого определяется расчетной схемой динамической системы, задачами исследования. Так, например, при исследовании колесной машины её представляют в виде простейшей динамической схемы, а в качестве возмущения используют профиль дороги по одной колее или сумму профилей под левой и правой колесами [10].

Профиль дороги исследователи динамики автомобилей делят на три составляющие – микропрофиль, макропрофиль и шероховатости, что обуславливается их различным воздействием на автомобиль. Макропрофиль включает плавно изменяющиеся не-

ровности длиннее 100 м и более, не вызывающие колебаний подрессоренной массы, но оказывают воздействие на режимы работы двигателя и динамики машины. Микропрофиль состоит из неровностей длиной от 10 см до 100 м, возбуждающих колебания подрессоренной массы. Неровности менее 10 см считаются шероховатостями, которые сглаживаются шинами и не оказывают заметных влияний на колебания подрессоренной массы [10].

В ранних исследованиях предлагалось разделить неровностей на четыре группы [10]:

- импульсные неровности – короткие длиной до 0,3 м, их воздействие на динамическую систему аналогично приложению импульса вертикальной силы;
- бугры и впадины длиной 0,3–6,0 м, вызывающие колебания подрессоренных и неподдресоренных масс автомобиля. Условно они делятся на короткие – 0,3–1,0 м и длинные 1,0–6,0 м;
- ухабы длиной 6,0–25,0 м вызывают низкочастотные колебания на высоких скоростях движения автомобиля;
- уклоны длиной 6,0–25,0 м не оказывают значительного влияния на колебания автомобиля.

Здесь же неровности дороги предлагается делить на три группы по высоте:

- шероховатости – неровности высотой до 1 см при длине до 0,3 м – сглаживаются шинами;
- бугры и впадины – неровности глубиной до 30 см и ухабы с крутизной до 0,03 вызывают интенсивные колебания автомобиля и оказывают влияние на плавность его хода;
- препятствия – выбоины глубиной свыше 30 см и ухабы с крутизной свыше 0,03, а также рвы, канавы, пороги и т.д., которые в основном влияют на режимы движения автомобиля.

В размещении неровностей по их длине на поверхности дороги приняты следующие закономерности:

- периодические неровности одинаковой длины и формы;
- единичные неровности с редким размещением на поверхности.

Неровности микропрофиля трелевочного волока, оказывающие возбуждающее воздействие на трелевочную систему, имеют случайную изменчивость, как по длине оси колеи, так и между колеями в каждом конкретном поперечном сечении волока. Математическое моделирование свойств неровностей дорог, пахотного поля сельскохозяйственных угодий, трелевочного волока базируется на вероятностно-статистических методах. До шестидесятых годов XX века формирование представления о свойствах опорной поверхности мобильных систем и машин различного назначения проводилось на основе дискретизации микропрофиля с определением отдельных неровностей, с описанием их размеров и формы, последовательности размещения и воздействия на динамическую систему. При этом реакция, например, колебательной системы, в динамике которой формируются изучаемые процессы, или нагруженность конструкции, представляется в виде детерминированных функций.

В последнее десятилетие для моделирования неровностей опорной поверхности (дороги, поверхности поля, волока), в зависимости от аргумента, применяется теория случайных функций или процессов. Случайной функцией считается такая функция, которая при любом значении аргумента является случайной величиной. В случайной

функции нет определенной зависимости и заранее не известно, какое значение примет функция в результате опыта. Если аргумент время, то функция считается случайным процессом.

В фундаментальных работах по исследованию динамики автомобилей и их форсированных испытаний [8] при математическом моделировании микропрофилей дорог сделаны следующие выводы:

- в пределах данного типа дороги микропрофиль и его воздействие статистически не зависят от расположения участка наблюдения и их характеристики не изменяются на достаточно длинных участках дороги;
- модели микропрофиля дорог укладываются в узкий класс случайных функций – случайных стационарных и эргодичных функций;
- эмпирические распределения ординат и экстремумов или высот неровностей описываются нормальными или близкими к нормальным законами; это позволило утверждать, что случайные функции, моделирующие микропрофиль дороги, следует считать гауссовскими.

Для получения информации о микропрофиле применяются два метода. Прямой метод измерения ординат неровностей поверхности с последующей математической обработкой для получения статистических характеристик микропрофиля – корреляционной функции и спектральной плотности. Косвенный метод сводится к измерению и регистрации колебаний какой-либо динамической системы при движении по неровностям и трансформации этих колебаний в показатели микропрофиля [10]. При получении статистических характеристик косвенным методом дисперсия микронеровностей проселочной дороги в 15 раз больше, чем при прямом методе. Столь разительное отличие значений дисперсии формирует определенное недоверие к косвенному методу. При прямом методе измерения неровности поверхности применяются различные технические решения от нивелирования до сложных систем с использованием щупов, маятников и т.д. Упрощенные методы и средства обладают низкой производительностью, а сложные не пригодны для применения в условиях лесосеки.

В опубликованных работах по измерению микропрофилей поверхности не встречено четкого определения шага квантования и длины мерного участка дороги, волока, поля.

Ведущие исследователи неровностей автомобильных дорог [8, 10] считают общепризнанным, что при длине мерного участка 0,5–1,0 км с учетом предварительных косвенных оценок можно получить информацию для построения статистических характеристик микропрофиля с интервалом квантования 5 см. Здесь же отмечается, что указанный выше объем информации для математического моделирования во многих случаях завышен. Встречается информация о получении сведений о микропрофиле дорог методом нивелирования при длине мерного участка 100–200 м [10].

Обычно выбор шага квантования связывают с верхней частотой микронеровностей или длиной волны. Рекомендуется максимальную (L_{max}) и минимальную (L_{min}) длину волн, входящих в микропрофили, принимать в зависимости от реальной скорости движения по дороге определенного типа или от уровня неровностей. Например, для дорог с короткими неровностями, такими как булыжники, кочки, корни, необходимо учитывать неровности длиной до 10 см, а для автомобилей, совершающих движение по автомагистрали, можно пренебречь неровностями длиной менее 1 м [9].

Встречаются работы по определению шага квантования Δt осциллографических записей с использованием верхней частоты спектра процесса ω_s

$$\Delta t = \frac{\pi}{r\omega_g} \quad (3)$$

Значения коэффициента r в исследованиях применяются от 1,0 до 10,0. При исследовании сельскохозяйственных агрегатов рекомендуется $r=1,0$, а время регистрации процесса $T \approx (400-600)\Delta t$. Следует отметить отсутствие связи шага квантования с параметрами движителя, прежде всего с длиной опорной поверхности гусеницы и длиной пятна контакта шины, которые могут быть 1–2 м и более. Понятно, что соотношение длин, например, впадины поверхности и пятна контакта шины или центра давления гусеницы, будет определять характер воздействия волока на колебания подрессоренной массы трелевочной системы. Многолетние исследования эксплуатационных и нагрузочных режимов лесопромышленных тракторов в полигонных и производственных условиях позволили установить шаг квантования осциллограмм, характеризующих изменение свойств волока, $\Delta t=1,0$ с [1].

Анализ работ по исследованию микропрофиля дорог и полей сельскохозяйственных угодий позволяет утверждать, что обоснование длины мерного участка отсутствует. С нашей точки зрения, для обоснования длины мерного участка волока при получении статистических характеристик микропрофиля целесообразно применять методику, используемую при исследовании эксплуатационных режимов работы трелевочных тракторов [1], в основу которой положены значения коэффициента вариации микронеровностей волока, требуемой достоверности и допустимой ошибки. Исходя из этого, по «Номограмме достаточно больших чисел» или «Краткой таблице достаточно больших чисел» определяется необходимое количество отсчетов (изменений), а следовательно, и длина мерного участка волока. Для определения значения коэффициента вариации микронеровностей волока находится их закон распределения, т.е., как рекомендуется [8], проводится «предварительная косвенная оценка представительности информации». В СПбГЛТА разработана методика и аппаратура для исследования эксплуатационных режимов работы трелевочных тракторов, позволяющая получать «экспресс-информацию» о законах распределения сопротивления движению трактора по волоку, в которых отражаются и неровности волока [11].

Статистики законов распределения могут служить основой выбора числа отсчетов, а следовательно, и обоснования длины мерного участка волока. Для этого необходимо определить коэффициент вариации процесса, задаться вероятностью и допустимой ошибкой.

Коэффициент вариации или мера изменчивости процесса (V) определяется по формуле:

$$V = \frac{\sigma}{M} \cdot 100, \quad (4)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение; M – математическое ожидание.

При коэффициенте вариации менее 10 целесообразно использовать «Номограмму достаточно больших чисел» для величины вероятности $P=0,95$, при этом необходимо задаться желательной допустимой ошибкой ε . Опыт исследования трелевочных тракторов [1], сельскохозяйственных машин и техника статистических исчислений позволяют утверждать, что при значениях коэффициента вариации более 10 число отсчетов можно определить по Таблице достаточно больших чисел.

Для определения длины мерного участка волока, на основании результатов экспериментальных исследований [4], определены законы распределения неровностей четырех волоков, статистики которых приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Статистики закона распределения неровностей трелевочных волоков

Волок	Математическое ожидание M , см	Среднее квадратичное отклонение σ , см	Коэффициент вариации V
1	22,4	1,77	7,9
2	17,9	1,35	7,5
3	25,2	1,79	7,1
4	34,7	2,77	7,9

Для исследуемых волоков при $P=0,95$ и $\varepsilon=0,02$ число отсчетов составляет около шестидесяти. Следовательно, длина мерных участков волоков при квантовании 0,5–1,0 м будет составлять от 30 до 60 м. Следует отметить, что площадь и длина трелевочных волоков регламентируются правилами заготовки древесины и лесоводственными требованиями к технологическим процессам лесосечных работ. Согласно известным нормативным документам, длина пасечных волоков в летний период (при непромерзшем грунте) не должна превышать в лесах первой и второй групп 250 м, третьей группы – 300 м. Иногда длина волока может быть увеличена до 500 м. При рубках ухода магистральные технологические коридоры закладываются с таким расчетом, чтобы длина пасечных волоков, как правило, не превышала 250 м.

Вывод. На основании анализа работ специалистов сельского хозяйства и специалистов в области испытания автомобилей определен оптимальный шаг квантования и длина мерного участка волока при проведении исследовательских испытаний трелевочных тракторов и трелевочных систем на их базе в производственных условиях, с учетом специфики лесопромышленного производства.

Список литературы

1. Анисимов, Г. М. Условия эксплуатации и нагруженность трансмиссии трелевочного трактора: научное издание / Г. М. Анисимов. – М. : Лесная промышленность, 1975. – 168 с.
2. Григорьев, И. В. Характеристики микропрофилей трелевочных волоков, определяющие динамическое уплотнение почв / И. В. Григорьев // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр.; под общей редакцией А. Я. Панфилова. – Брянск, 2005. – Вып. 10. – С. 10-13.
3. Капица, П. Л. Эксперимент, теория, практика / П. Л. Капица. – М. : Наука, 1981. – 496 с.
4. Григорьев, И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования: научное издание / И. В. Григорьев. – СПб. : Издательство ЛТА, 2006. – 236 с.
5. Кочнев, А. М. Рабочие режимы отечественных колесных трелевочных тракторов: научное издание / А. М. Кочнев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 520 с.
6. Кочнев, А. М. Теория движения колесных трелевочных систем: научное издание / А. М. Кочнев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 612 с.
7. Григорьев, И. В. Методика определения характеристик микропрофиля трелевочного волока / И. В. Григорьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – СПб. : ЛТА, 2005. – Вып. 176. – С. 77-84.
8. Яценко, Н. Н. Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей / Н. Н. Яценко. – М. : Машиностроение, 1984. – 328 с.
9. Лурье, А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А. Б. Лурье. – М. : Колос, 1970. – 376 с.
10. Динамика системы дорога–шина–автомобиль–водитель / А. А. Хачатуров [и др.]; под ред. А. А. Хачатурова. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.
11. Патент на полезную модель Мобильный измерительный комплекс / Г. М. Анисимов, И. В. Григорьев, А. М. Кочнев, и др. – № 48052; опубл. 10.09.2005, Бюлл. № 25. – 5 с.

Статья поступила в редакцию 01.02.11.

I. V. Grigoriev, M. V. Tsygarova, A. I. Zhukova, D. V. Lepilin, G. Yu. Esin

DESIGN OF EXPERIMENT IN THE RESEARCH OF INTERACTION OF LOGGING SYSTEM WITH LOGWAY

On the basis of mathematical theory of design of experiment and statistical dynamics a plan of carrying out of experimental researches of interaction of logging systems with logway under working environment exploitation is established.

Key words: *logging tractor, ground, microroughness, logging, design of experiment, statistical dynamics.*

ГРИГОРЬЕВ Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. Область научных интересов – технология и машины лесопромышленного комплекса и лесного хозяйства. Автор 150 публикаций.

E-mail: silver73@inbox.ru

ЦЫГАРОВА Марина Валентиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и машин лесозаготовок и прикладной геодезии Ухтинского государственного технического университета. Область научных интересов – технология и машины лесопромышленного комплекса и лесного хозяйства. Автор 86 публикаций.

E-mail: mtsygarova@mail.ru

ЖУКОВА Антонина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. Область научных интересов – технология и машины лесопромышленного комплекса и лесного хозяйства. Автор 54 публикаций.

E-mail: zhukova_tonya@mail.ru

ЛЕПИЛИН Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. Область научных интересов – технология и машины лесопромышленного комплекса и лесного хозяйства. Автор 15 публикаций.

E-mail: lepilindv@yahoo.com

ЕСИН Григорий Юрьевич – аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. Область научных интересов – технология и машины лесопромышленного комплекса и лесного хозяйства. Автор шести публикаций.

E-mail: tlzp@inbox.ru