

стью обрабатываемых сред: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2007. 360 с.

4. Дисковый рабочий орган заглаживающей машины с дополнительным круговым

движением заглаживающего диска: пат. 2404050 Рос. Федерация. № 2009119950/03; заявл. 26.05.2009; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 17. 4 с.

УДК 629.114.2:629.11.013

А.А. Климов, А.В. Стручков*

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУЛЬДОЗЕРНОГО АГРЕГАТА

Приведен регрессионный анализ вероятностно-статистических закономерностей изменения выходных показателей бульдозерного агрегата как динамической системы, полученных в результате сравнительных экспериментальных исследований динамической нагруженности трансмиссионных систем двух типов: механической и гидромеханической. Рассмотрены такие выходные показатели, как частоты вращения коленчатого вала двигателя (турбинного вала ГТР), действительная скорость бульдозирования, буксование движителя, тягово-динамический КПД, крюковая мощность и техническая производительность.

Ключевые слова: бульдозерный агрегат, регрессионный анализ, энергонасыщенность, гидромеханическая трансмиссия, механическая трансмиссия, коэффициент буксования, коэффициент корреляции, коэффициент вариации.

В работе [1] нами описывались конструкция и назначение экспериментального бульдозерного агрегата. К его выходным показателям как динамической системы можно отнести частоту вращения коленчатого вала двигателя (турбинного вала ГТР), действительную скорость бульдозирования, буксова-

ние движителя, тягово-динамический КПД, крюковую мощность и техническую производительность.

На рис. 1 показана зависимость средней по передачам скорости бульдозирования от уровня энергонасыщенности.

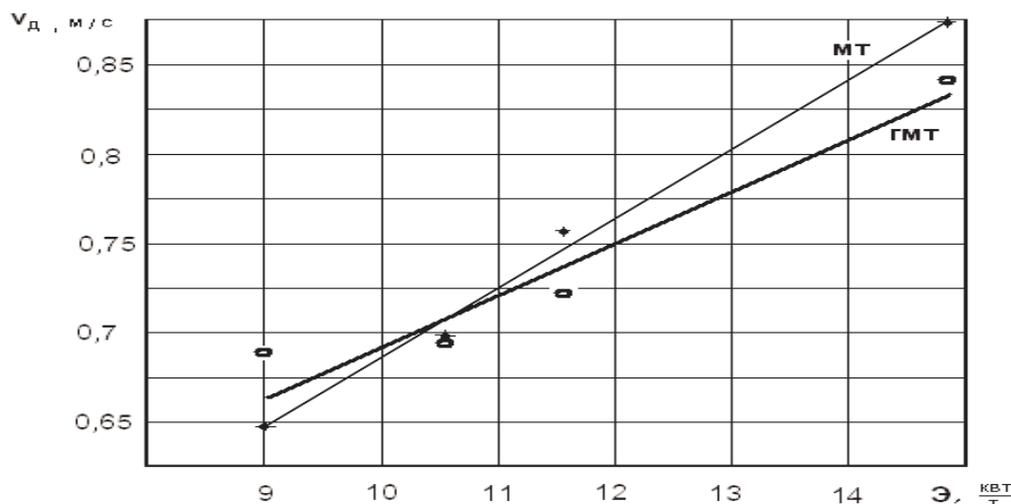


Рис. 1. Зависимость средней по передачам скорости бульдозирования от уровня энергонасыщенности.

* - автор, с которым следует вести переписку.

Как видно из представленного графика, скорость бульдозирования увеличивается пропорционально росту энергонасыщенности как для трактора с механической трансмиссией (МТ), так и для трактора с гидромеханической трансмиссией (ГМТ). Изменение действительной скорости бульдозирования в функции энергонасыщенности выражается регрессиями:

$$V_d^{ГМТ} = 0,46 + 0,024 \cdot \mathcal{E};$$

$$V_d^{МТ} = 0,345 + 0,034 \cdot \mathcal{E}.$$

Коэффициенты корреляции опытных данных с указанными регрессиями составили 0,95 и 0,96.

Характер распределений действительной скорости соответствует нормальному закону. Коэффициент вариации при этом уменьшается с ростом величины действительной скорости пропорционально (рис. 2). Изменение коэффициента вариации в функции действительной скорости бульдозирования выражается регрессиями:

$$\gamma_{V_d}^{МТ} = 81 - 69 \cdot V_d;$$

$$\gamma_{V_d}^{ГМТ} = 79 - 63,3 \cdot V_d.$$

Коэффициенты корреляции с опытными данными при этом составили 0,74 и 0,70.

Средняя по передачам частота вращения коленчатого вала двигателя с ростом рабочей скорости (увеличением энергонасыщенности) растет пропорционально (рис. 3).

Функции частоты вращения вала двигателя (турбины ГТР) от величины рабочей скорости выражаются регрессиями:

$$n_{дв} = 220 + 2050 \cdot V_d;$$

$$n_T = -420 + 2325 \cdot V_d$$

с коэффициентами корреляции 0,99 и 0,97 соответственно.

Характер распределения частоты вращения коленчатого вала двигателя и турбины ГТР с наибольшей вероятностью соответствует усеченному нормальному закону. Коэффициенты вариации с ростом рабочей скорости выражаются регрессиями:

$$\gamma_{n_{дв}} = 0,231 \cdot V_d - 0,135;$$

$$\gamma_{n_T} = 0,394 \cdot V_d - 0,135.$$

При этом коэффициенты корреляции с опытными данными составили 0,4 и 0,73 соответственно.

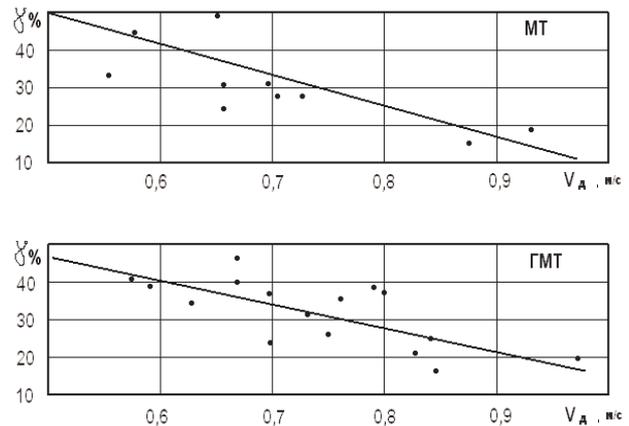


Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации от величины действительной скорости бульдозирования.

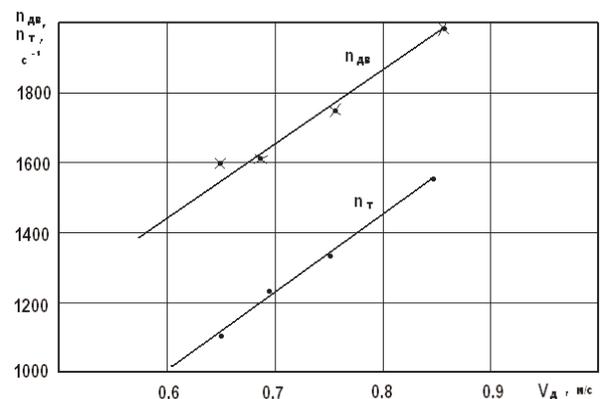


Рис. 3. Зависимость частоты вращения коленвала двигателя (турбины ГТР) от величины действительной скорости бульдозирования.

С ростом энергонасыщенности бульдозерного агрегата средняя величина коэффициента буксования в динамике возрастает примерно пропорционально росту мощности двигателя (таблица 1). Это объясняется тем, что, во-первых, при росте мощности (рабочей скорости) бульдозерист не успевает управлять отвалом, и он часто врезается в грунт, обеспечивая повышенное буксование агрегата. Во-вторых, резкое заглубление и выглубление отвала делает поверхность дна траншеи неровной, что определяет уменьшение площади контакта гусеницы с грунтом и в конечном итоге влечет также дополнительное увеличение буксования. В-третьих, с ростом рабочей скорости, особенно выше технологического предела (около $V_d = 1$ м/с), наступает явление «завинчивания» отвала (с ростом скорости расширяется диапазон изменения контактных усилий сопротивления резанию по всей длине

режущей кромки отвала – согласно теории образования уплотненного ядра). Относительно резкое колебание сил сопротивления резанию приводит к тому, что режущую кромку ножа разворачивает относительно горизонтальной поверхности дна траншеи на какой-то угол. Это вызывает перераспределение эпюры давления гусениц на грунт и при высоких скоростях трактора вызывает его увод в сторону наклона. Поэтому оператор для сохранения прямолинейного движения вынужден постоянно манипулировать фрикционами, что вызывает повышенное буксование.

Увеличение частоты и амплитуды изменения тягового сопротивления при приблизи-

тельно равном среднем значении также влечет за собой увеличение буксования.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента буксования от рабочей скорости бульдозирования. Как видно из этого рисунка, увеличение рабочей скорости от 0,55 м/с до 0,77 м/с приводит к значительному снижению буксования (на 17 %), при скорости 0,77...0,78 м/с наблюдается резкое увеличение (на 23 %) буксования, а при дальнейшем увеличении рабочей скорости буксование увеличивается с темпом примерно 0,03 на каждые 0,05 м/с.

Таблица 1

Изменение среднего по передачам коэффициента буксования от энергонасыщенности и типа трансмиссии

Энергонасыщенность, Э, кВт/м	Тип трансмиссии	Коэффициент буксования		
		По величине	Зависимость от Э, %	Зависимость от типа трансмиссии
10,6	МТ	0,171	78	100
	ГМТ	0,156	75	91
11,6	МТ	0,193	81	100
	ГМТ	0,178	86	92
14,8	МТ	0,219	100	100
	ГМТ	0,207	100	94

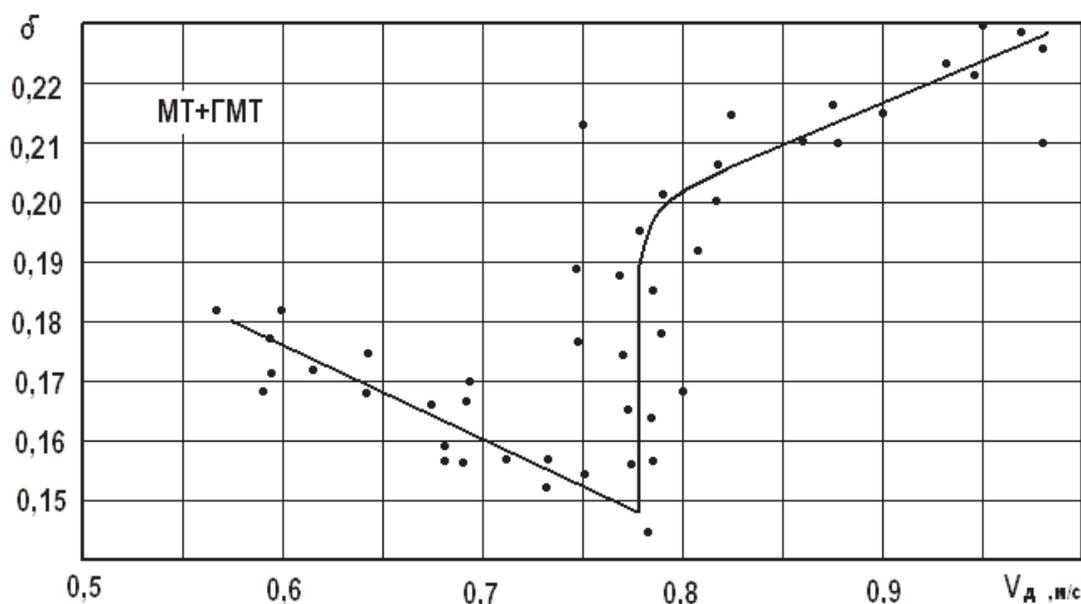


Рис. 4. Изменение коэффициента буксования в зависимости от величины рабочей скорости (независимо от типа трансмиссии).

Таким образом, для данного бульдозерного агрегата предел технологической скорости соответствует 0,77...0,78 м/с.

Устойчивая работа бульдозера происходит до 18...20 % буксования. В указанном диапазоне бульдозерный агрегат работает около 70...80 % рабочего времени в процессе бульдозирования.

Применение ГТР в трансмиссии бульдозерного агрегата не изменяет вышеуказанных тенденций изменения буксования, но позволяет уменьшить его на 6...9 %.

Анализ мощностного баланса бульдозерного агрегата, выполненный по средним значениям распределений тягово-динамических параметров за рабочий элемент цикла, подробно рассматривается в работе [2]. Здесь мы рассмотрим краткую характеристику мощностного баланса.

Затраты мощности на перекачивание трактора (N_f) находятся в прямой пропорциональной зависимости от рабочей скорости бульдозирования (рис. 5).

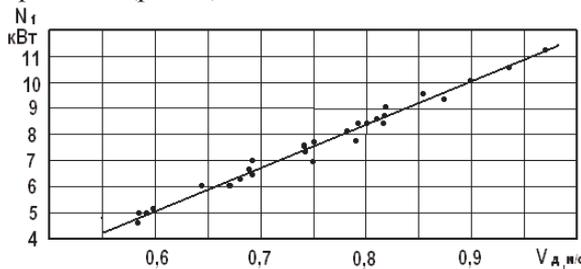


Рис. 5. Изменение величины N_f от изменения рабочей скорости.

Эта зависимость выражается регрессией (с коэффициентом корреляции равным 0,91): $N_f = 16,4 \cdot V_d - 4,8$.

В среднем 6,5...7 % мощности двигателя затрачивается на самопередвижение.

Часть мощности двигателя (26...32 %) теряется из-за недогрузки двигателя.

8...10 % мощности затрачивается на буксование движителя и 5,5...7 % – на гидропривод рабочего органа.

Изменение мощности двигателя, затрачиваемой на буксование, от рабочей скорости графически повторяет зависимость буксования от рабочей скорости (рис. 4), т. е. при повышении скорости выше 0,78 м/с эти затраты мощности резко увеличиваются.

Отбор мощности на крюке трактора с повышением рабочей скорости растет прямо пропорционально и выражается регрессиями при коэффициентах корреляции 0,89 и 0,93:

$$N_{кр}^{MT} = 12 + 55,6 \cdot V_d;$$

$$N_{кр}^{GMT} = 6 + 67,8 \cdot V_d.$$

Исследования показали, что суммарные потери мощности на самопередвижение, буксование и гидропривод рабочего органа растут с ростом рабочей скорости прямо пропорционально и одинаково для трактора с МТ и ГМТ. Этому росту соответствует регрессия с коэффициентом корреляции 0,8:

$$N_f + N_\delta + N_{ГП} = 4 + 25 \cdot V_d.$$

Потери мощности двигателя в механической части трансмиссии, гидротрансформаторе, на недогрузку двигателя при бульдозировании с ростом рабочей скорости до 0,9 м/с в МТ и до 0,97 м/с в ГМТ снижаются. Дальнейшее повышение скоростного режима приводит к повышению указанных потерь мощности двигателя в основном за счет увеличения его недогрузки на 12...13 % в МТ и на 5...15 % в ГМТ.

Потенциальная зависимость тягово-динамического КПД бульдозерного агрегата от рабочей скорости выражается параболой с коэффициентом корреляции 0,66:

$$\eta_T^{дин} = 0,117 + 0,86 \cdot V_d - 0,42 \cdot V_d^2.$$

До скорости бульдозирования $V_d=1,0$ м/с тягово-динамический КПД $\eta_T^{дин}$ возрастает до 0,55, а при дальнейшем повышении рабочей скорости до 1,3 м/с уменьшается до 0,49.

С учетом вероятностного характера нагрузки на крюке тягово-динамический КПД изменяется по более сложной зависимости: до скорости $V_d=0,95$ м/с этот показатель близок к потенциальной зависимости, при дальнейшем наращивании рабочей скорости тягово-динамический КПД резко снижается до $\eta_T^{дин}=0,35...0,45$. При этом данный параметр для трактора с ГМТ на 0,03...0,04 выше, чем для трактора с МТ.

С точки зрения тягового КПД наиболее благоприятная зона рабочих скоростей бульдозирования 0,8...0,9 м/с.

Производительность бульдозерного агрегата с увеличением рабочей скорости (через повышение энергонасыщенности) растет (рис. б) в соответствии с регрессией при коэффициенте корреляции 0,9:

$$П_T = -296,4 + 910,3 \cdot V_d - 492,2 \cdot V_d^2.$$

Увеличение рабочей скорости до 0,77 м/с способствует почти пропорциональному росту производительности, дальнейший прирост

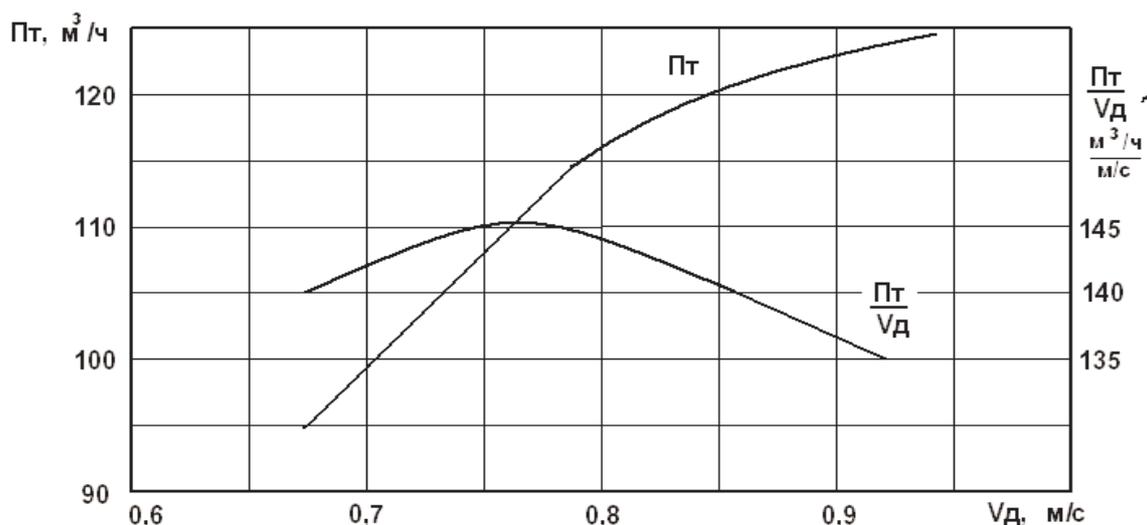


Рис. 6. Зависимость производительности от величины рабочей скорости бульдозирования

рабочей скорости приводит к уменьшению производительности на единицу повышения скорости (график P_t/V_d на рис. 6).

Анализ технической производительности на передачах, обеспечивающих максимальную производительность, показывает, что применение гидромеханической трансмиссии приводит к ее повышению по сравнению с механической трансмиссией при энергонасыщенности:

$\mathcal{E} = 9,0$ кВт/т на 8,7 %;

$\mathcal{E} = 10,6$ кВт/т на 9 %;

$\mathcal{E} = 11,6$ кВт/т на 10,2 %;

$\mathcal{E} = 14,8$ кВт/т на 10,7 %, т. е. в среднем на 9,6 %.

Таким образом, регрессионный анализ статистических характеристик выходных параметров бульдозерного агрегата показал, что увеличение его энергонасыщенности приводит к пропорциональному увеличению скоростного режима работы. При этом технико-экономические показатели растут не пропор-

ционально. Работа на скорости большей $V_d=0,9\dots 1,0$ м/с приводит к резкому возрастанию потерь мощности двигателя от недогрузки и на буксование движителя и, как следствие, к ухудшению тягово-динамического КПД агрегата, замедлению темпов роста производительности.

Литература

1. Климов А.А. Экспериментальный промышленный трактор для исследования вопросов оптимизации энергонасыщенности // Совершенствование конструкций и повышение надежности тракторов и погрузчиков: сб. ст. Красноярск, 2003. С. 18-28.

2. Богатырев А.П. Исследование влияния энергонасыщенности на тяговую динамику и производительность трактора-бульдозера: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 21с.