

ХОДОВЫЕ СИСТЕМЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ВЫПОЛНЯЕМЫХ ОПЕРАЦИЙ

RUNNING GEAR OF MACHINE-TRACTOR UNITS AND THEIR INFLUENCE ON THE QUALITY OF PERFORMED OPERATIONS

С.И. КАМБУЛОВ, д.т.н.
В.Б. РЫКОВ, д.т.н.
И.В. БОЖКО, к.т.н.
В.В. КОЛЕСНИК

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград,
Россия, kambulov.s@mail.ru

S.I. KAMBULOV, DSc in Engineering
V.B. RYKOV, DSc in Engineering
I.V. BOZHKO, PhD in Engineering
V.V. KOLESNIK

The Federal State Budget Scientific Institution «Agrarian Science
Center «Donskoy», Zernograd, Russia, kambulov.s@mail.ru

Машинно-тракторный агрегат является ключевым элементом в выполнении технологических операций при возделывании сельскохозяйственных культур. На современных тракторах применяются ходовые системы с колесными и гусеничными движителями. Почва при взаимодействии с движителями трактора, с одной стороны, распыляется при буксовании, с другой – уплотняется. При этом колесные движители имеют буксование в несколько раз выше, чем гусеничные. Цель исследования – анализ ходовых систем машинно-тракторных агрегатов и их влияние на качество выполняемых технологических операций. В статье рассмотрен анализ параметров колесного и сменного гусеничного движителей к трактору К-701, которые имеют одинаковые габариты. Одним из главных внешних воздействий на агрегат является профиль поверхности поля. Основным источником колебаний трактора являются неровности пути. При этом, участки, типичные для работы машинно-тракторных агрегатов, очень разнообразны, наиболее характерными из них являются, стерня, вспаханное поле, подготовленное поле, полевая дорога и другие. Анализ спектральных плотностей профиля поверхности поля, на котором работают тракторы, показывает, что с увеличением скорости движения спектральная плотность быстро уменьшается, а максимум спектральной плотности смещается в сторону более высоких значений частот. Установлено, что диапазон частот, который в наибольшей степени воздействует на машинно-тракторный агрегат на базе трактора К-701 на сменном гусеничном движителе, составляет $1...4 \text{ с}^{-1}$, на колесном движителе – $1...7 \text{ с}^{-1}$. Сменный гусеничный движитель к трактору класса 5 имеет существенные преимущества по сравнению с колесным движителем, так как он фильтрует (сглаживает) в 2,1...2,8 раза больше неровностей, что улучшает условия труда, плавность хода и другие показатели машинно-тракторного агрегата.

Ключевые слова: ходовая система, движитель, спектральная плотность, опорное основание.

The machine-tractor unit is a key element in an implementation of technological operations in the cropping. Running gears with wheeled and caterpillar propulsion device are used in the modern tractors. During an interaction of the ground with tractor propulsion devices, the ground is pulverized on one side and it is compacted on the other side during the slipping. Besides, the wheeled movers have the slipping several times higher than caterpillar movers. The aim of the research is an analysis of running gears of machine-tractor units and their influence on the quality of performed technological operations. The paper discusses an analysis of parameters of wheeled and replaceable caterpillar movers to the tractor K-701, which have the same dimensions. One of the main external influences on the unit is the surface profile of the field. The main source of tractor oscillations are the unevennesses of the way. At the same time, characteristic areas for the operation of machine-tractor units are very various, the most characteristic of them are a stubble field, a plowed field, a prepared field, a field road and others. The analysis of spectral densities of the surface profile of the field on which the tractor operates shows that with increasing speed, the spectral density decreases rapidly, and the maximum of the spectral density shifts toward higher values of the frequencies. It has been established that the frequency range, which has the greatest effect on the machine-tractor unit on the basis of the tractor K-701 on the replacement caterpillar mover $1...4 \text{ sec}^{-1}$, on the wheel mover – $1...7 \text{ sec}^{-1}$. The replaceable caterpillar mover for a 5 class tractor has significant advantages over a wheeled mover, since it filters (smoothes) 2,1...2,8 times more irregularities, which improves working conditions, smooth of running and other indicators of the machine-tractor unit.

Keywords: running gear, mover, spectral density, support base.

Введение

На современных тракторах применяются ходовые системы с колесными и гусеничными движителями. Движитель является важнейшим элементом конструкции, так как преобразует ведущий момент в касательную силу тяги, что определяет не только эксплуатационно-технологические и экономические показатели мобильных энергетических средств (МЭС), но и, взаимодействуя с опорным основанием, изменяет ее состояние, что влияет на параметры почвы, которые в свою очередь определяют режим развития растений. Опорное основание в свою очередь оказывает влияние на динамику машинно-тракторных агрегатов (МТА).

Почва при взаимодействии с движителями трактора, с одной стороны, распыляется при буксовании, с другой – уплотняется. Разные типы движителей имеют разное буксование при одних и тех же условиях. При этом, колесные движители имеют буксование в несколько раз выше, чем гусеничные. Увеличение массы трактора может несколько снизить буксование, но при этом увеличивается нагрузка на движители, а следовательно, и на опорное основание, что приводит к значительному уплотнению почв и снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

Цель исследования

Целью исследования является анализ ходовых систем машинно-тракторных агрегатов и их влияние на качество выполняемых технологических операций.

Материалы и методы исследований

Одним из главных внешних воздействий на агрегат является профиль поверхности поля. Он оказывает существенное влияние на неравномерность хода рабочих органов машины, на линейные и угловые колебания агрегата в целом. При изучении движения машин по поверхности дорожные препятствия не могут рассматриваться отдельно от машины [1], так как одни и те же неровности оказывают разное влияние на проходимость машин. Для трактора Т-25 базой 1780 мм наклонная поверхность длиной 2500 мм является склоном, а для трактора К-701 базой 3200 мм – выступом. С точки зрения проходимости ограничением для трактора Т-25 является сцепление, которое он может развивать для преодоления этого склона, а для трактора К-701 – клиренс,

который не позволит ему зависнуть на этом выступе.

Таким образом, кроме высоты неровностей важной характеристикой является длина неровности.

При этом очевидным является то, что сопоставляя длину неровностей с длиной опорной части движителя, можно разделить неровности поверхности на три типа. Короткие неровности могут фильтроваться движителем и не вызывать никаких колебаний трактора. Длинные неровности движитель полностью копирует, и для преодоления склона такой неровности необходима только достаточная сила тяги.

При длине неровности, соразмерной с длиной опорной поверхности движителя, уже нельзя полагать, что движитель копирует эту неровность. В связи с этим возникают колебания, которые передаются на подрессоренную массу трактора.

Но во всех случаях необходима широкая и достоверная информация о профиле поверхности во всех условиях, в которых работают сельскохозяйственные МТА.

Такую информацию обычно получают специальными устройствами, которые называют профилографами.

Результаты и их обсуждение

Любой реальный профиль, по которому движется машины, в общем случае можно представить зависимостью $y = y(x)$.

Эту функцию необходимо рассматривать как реализацию случайной функции, характеризующую внешние условия движения по неровностям пути.

Простейшими характеристиками случайной функции являются математическое ожидание и корреляционная функция. Математическое ожидание не оказывает влияния на характер колебания трактора, поэтому для описания внешних условий движения МТА по поверхностям опорного основания применяется корреляционная функция.

Корреляционная функция уже не является случайной, и поэтому ее обычно аппроксимируют аналитическими выражениями.

Основным источником колебаний трактора являются неровности пути. При этом, участки, типичные для работы МТА, очень разнообразны, наиболее характерными из них являются, стерня, вспаханное поле, подготовленное поле, полевая дорога и др.

Для характеристики этих фонов были установлены корреляционные функции профиля поверхности, которые аппроксимировали выражением:

$$\rho(l) = A_1 e^{-\alpha_1 |l|} + A_2 e^{-\alpha_2 |l|} \cos \beta_2 l, \quad (1)$$

где A_i , α_i , β_i – коэффициенты.

Коэффициенты можно определить любым из методов, применяемым в теории аппроксимации.

Корреляционная функция позволяет определить дисперсию случайного процесса и степень связи между его сечениями.

При известной корреляционной функции спектральную плотность получают путем ее функционального преобразования по формуле:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\infty} R(l) \cos \omega l \, dl,$$

где $\omega = 2 \pi f$ – частота.

Для корреляционной функции (1) при условии, что $A_1 = 0$, спектральная плотность определялась по формуле

$$S(\omega) = \frac{2\alpha D(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{\pi[(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2]},$$

где D – дисперсия случайного процесса; ω – частота.

При этом, для получения спектральных характеристик на различных скоростях движения коэффициенты α_i , β_i при скорости 1 м/с умножаются на эту скорость [2], т.е. $\alpha_{V_i} = \alpha_{V_1} \cdot V_i$; $\beta_{V_i} = \beta_{V_1} \cdot V_i$ (V_1 , V_i – соответственно, скорость, равная 1 м/с и i -я скорость движения агрегата).

Анализ спектральных плотностей профиля поверхности фона (рис. 1 и 2), на котором работают тракторы, показывает, что с увеличением скорости движения спектральная плотность при $\omega = 0$ быстро уменьшается, а максимум

спектральной плотности смещается в сторону более высоких значений частот [3, 4].

Частота среза для различных профилей поверхности неодинакова и составляет для профиля поверхности стерни $\omega = 5...6 \text{ с}^{-1}$, грунтовой дороги – 12 с^{-1} , парового поля – $9...10 \text{ с}^{-1}$, вспаханного поля – $10...11 \text{ с}^{-1}$.

Спектральная плотность позволяет определить длину неровностей опорного основания по формуле $\omega = \frac{2\pi}{T}$, так как каждой частоте ω соответствует своя длина неровностей (T – период), и сопоставить эту длину с длиной опорного основания движителей. При этом можно установить, какие неровности фильтруются ими и не воздействуют на подрессоренную часть трактора, то есть не вызывают колебаний.

Для примера сопоставим параметры колесного и сменного гусеничного (разработка ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской») движителей к трактору К-701, которые имеют одинаковые габариты.

Длина опорной поверхности сменного гусеничного движителя к трактору К-701 составляет $L_r = 1650 \text{ мм}$, длина опорной поверхности колесного движителя этого трактора на шине Ф-81 для различных условий его работы изменяется в пределах $L_k = 590...770 \text{ мм}$.

Таким образом, длина опорной поверхности сменного гусеничного движителя в 2,8...2,1 раза больше, чем длина опорной поверхности колесного движителя.

Рассматривая спектральные характеристики различных фонов, характерные для работы трактора, можно отметить, что граничной частотой, которой соответствует условие $L_n < L_r$ (L_n – длина неровности), для гусеничного движителя является частота 4 с^{-1} , для колесного движителя – частота 7 с^{-1} . Все неровности

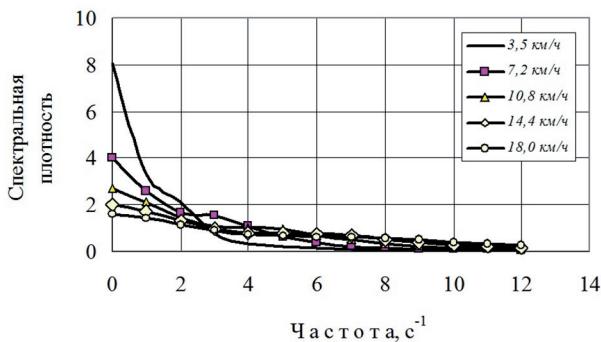


Рис. 1. Спектральная плотность профиля поверхности парового поля

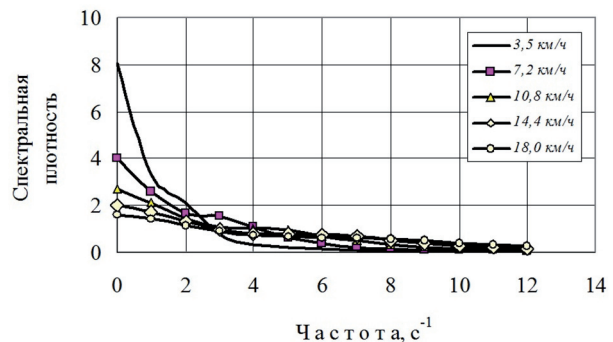


Рис. 2. Спектральная плотность профиля поверхности стерни

больше граничной фильтруются движителем, все неровности меньше граничной копируются движителем.

Таким образом, при взаимодействии с опорным основанием сменный гусеничный движитель имеет существенные преимущества, так как снижает динамичность процесса и фильтрует значительное количество неровностей, что обеспечивает лучшую плавность хода.

Определение длины неровностей, как уже отмечалось, производится по формуле $T = 2\pi/\omega$. При этом можно выделить те неровности, которые в наибольшей степени воздействуют на МТА, и упростить инженерные расчеты.

Так, например, если длина неровности совпадает с базой трактора, то относительное перемещение подрессоренных масс будет происходить только поступательно вертикально, так как передние и задние движители трактора будут всегда иметь одинаковую координату

при движении по синусоидальной неровности. Вытекает это из того, что синус – периодическая функция, и ее значения повторяются ровно через период. В этом случае происходит плоско-параллельное движение трактора, а центр масс, как и любая другая его точка, перемещается в относительном движении только вертикально. Такое движение имеет одну степень свободы, а следовательно, для изучения такого движения необходимо составить одно дифференциальное уравнение.

Если база трактора равна половине периода, то координаты передних и задних движителей каждый раз будут разными и трактор будет совершать только продольно-угловые колебания, но движение также будет иметь одну степень свободы.

Возможные схемы движения трактора К-701 на сменном гусеничном движителе в зависимости от длины неровностей профиля поверхности поля приведены на рис. 3.

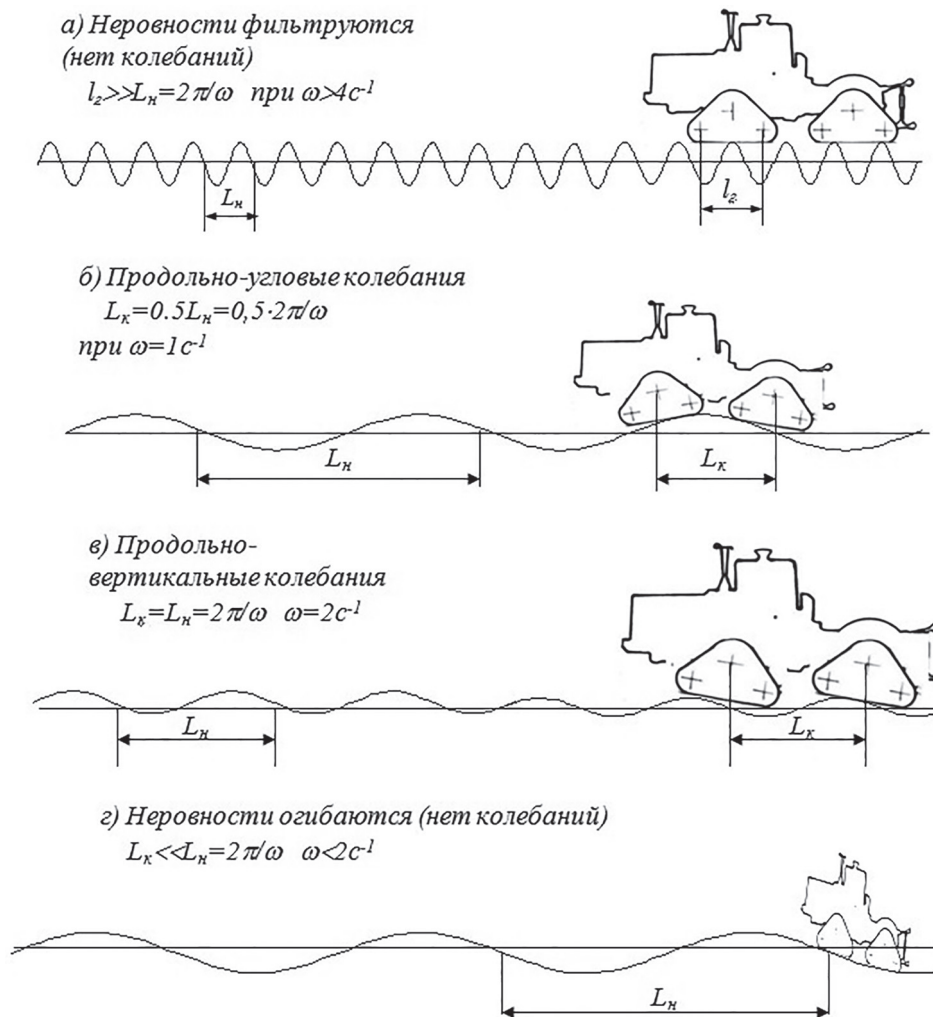


Рис. 3. Возможные схемы воздействий неровностей на МТА

Известно, что корреляционная функция связана со спектральной плотностью соотношением:

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega.$$

Смысл этого выражения состоит в том, что корреляционная функция представляет собой сумму гармонических составляющих с амплитудой, зависящей от частоты.

Полагая в этой формуле $\tau = 0$, получим:

$$K(\tau) = K(0) = D = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega,$$

где D – дисперсия случайного процесса.

Дисперсия случайного процесса представляет собой сумму элементарных дисперсий $S(\omega) d\omega$, приходящихся на элементарный частотный интервал $d\omega$, прилегающий к частоте ω .

С учетом этого можно определить дисперсию процесса по диапазонам частот по формуле:

$$D_i = \sum_1^n S_i(\omega) \Delta\omega.$$

Так как часть неровностей, как уже отмечалось, фильтруется движителем, то в процессе воздействий на МТА не участвует и дисперсия опорного основания, приходящаяся на этот диапазон.

Можно отметить, что в наибольшей степени на трактор класса 5 при работе его на характерных фонах воздействуют неровности в диапазоне частот $\omega = 1...4 \text{ с}^{-1}$, так как они вызывают или продольно-угловые, или продольно-вертикальные, или те и другие колебания одновременно.

За этими диапазонами частот неровности профиля поверхности поля или фильтруются (см. рис. 3, а) и не вызывают колебаний, или огибаются движителями трактора (см. рис. 3, б), и в этом случае ограничением движения МТА может быть только сцепление движителей с почвой при преодолении ими подъема. Для трактора К-701 на колесном движителе этот частотный диапазон составляет $\omega = 1...7 \text{ с}^{-1}$.

В табл. 1 приведены статистические характеристики воздействий различных профилей на МТА [5].

Анализ табличных данных показывает, что значительная часть дисперсии приходится на длинные неровности, т.е. те которые огибаются движителями трактора и практически не вызывают колебаний подрессоренных масс даже при высокой скорости движения. На паровом поле на долю этого диапазона неровностей ($0...1 \text{ с}^{-1}$) приходится 21...53 % от общей дисперсии профиля поверхности поля, на вспаханном поле, стерне и полевой дороге приходится, соответственно, 11...30 %, 33...78 % и 8...12 %.

Таблица 1

Статистические характеристики воздействий различных профилей поверхности поля на МТА

Тип профиля поверхности поля	Скорость, м/с	Доля дисперсии, приходящаяся на частотный диапазон, %					
		Гусеничный движитель			Колесный движитель		
		0...1 с ⁻¹	1...4 с ⁻¹	более 4 с ⁻¹	0...1 с ⁻¹	1...7 с ⁻¹	более 7 с ⁻¹
Паровое поле	1	53	44	3	53	47	–
	2	34	50	16	34	65	1
	3	27	41	32	27	66	6
	4	21	39	40	21	66	13
Вспаханное поле	1	30	48	22	30	63	7
	2	17	42	41	17	65	18
	3	13	37	50	13	65	22
	4	11	32	57	11	63	26
Стерня	1	78	22	0	78	22	–
	2	58	40	2	58	42	–
	3	40	56	4	40	60	–
	4	33	54	13	33	67	–
Полевая дорога	5	12	43	45	12	73	15
	6	10	38	52	10	70	20
	7	8	30	62	8	64	28

Выводы

1. Основным источником колебаний МТА при работе их на характерных фонах (стерня, поле подготовленное под посев, вспаханное поле, полевая дорога и др.) являются неровности профиля поверхности поля.

2. При известных корреляционных функциях можно определить спектральные плотности профиля поверхности поля путем их функциональных преобразований. При этом, с увеличением скорости движения спектральная плотность при $\omega = 0$ быстро уменьшается, а максимум ее смещается в сторону более высоких частот. Частота среза для полученных спектральных характеристик для различных фонов неодинакова и составляет для профиля поверхности стерни $5-6 \text{ с}^{-1}$, грунтовой дороги – 12 с^{-1} , поля, подготовленного под посев – $9-10 \text{ с}^{-1}$, вспаханного поля – $10-11 \text{ с}^{-1}$.

3. Спектральная плотность позволяет определить длину неровности, соответствующую каждой частоте, и тем самым распределить неровности по длине. Сравнивая эти длины с конструктивными параметрами МТА, можно выделить те неровности, которые в наибольшей степени воздействуют на агрегат.

4. Диапазон частот, который в наибольшей степени воздействует на МТА на базе трактора К-701, на сменном гусеничном движителе, составляет $1-4 \text{ с}^{-1}$, на колесном движителе – $1-7 \text{ с}^{-1}$.

5. Сменный гусеничный движитель к трактору класса 5 имеет существенные преимущества по сравнению с колесным движителем, так как он фильтрует (сглаживает) в 2,1–2,8 раза больше неровностей, что улучшает условия труда, плавность хода и другие показатели МТА. На активный диапазон частот колесного движителя приходится значительно большая доля дисперсии профиля поверхности поля, чем у сменного гусеничного движителя; на паровом поле эта величина составляет 108–169 %, на вспаханном поле, полевой дороге и стерне – соответственно, 131–197 %, 170–213 % и 105–124 %.

Литература

1. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность – машина. М.: Машиностроение, 1973. 514 с.
2. Силаев А.А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 190 с.
3. Камбулов С.И., Рыков В.Б., Божко И.В., Колесник В.В. Характеристики внешних воздействий на работу машинно-тракторных агрегатов // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 9. С. 45–52.
4. Анохин В.И., Песков А.Ф. Результаты полевых экспериментальных исследований гусеничного сельскохозяйственного трактора с гидромеханической трансмиссией // Доклады МИИСП. Том 2. Вып. 2. 1965. С. 85–90.
5. Камбулов С.И. Механико-технологические основы повышения уровня функционирования сельскохозяйственных агрегатов. Ростов н/Д: Изд-во ООО «Терра Принт», 2006. 304 с.

References

1. Bekker M.G. Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' – mashina [The introduction to the theory of locality-machine systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 514 p.
2. Silaev A.A. Spektral'naya teoriya podressorivaniya transportnykh mashin [The spectral theory of suspension of transport vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 190 p.
3. Kambulov S.I., Rykov V.B., Bozhko I.V., Kolesnik V.V. The characteristics of external influences on the operation of machine and tractor units // Traktory i sel'khoz mashiny. 2017. No 9, pp. 45–52 (in Russ.).
4. Anokhin V.I., Peskov A.F. The results of field experimental researches of a caterpillar agricultural tractor with hydromechanical transmission // Doklady MIISP. Vol. 2. Vyp. 2. 1965, pp. 85–90 (in Russ.).
5. Kambulov S.I. Mekhaniko-tehnologicheskie osnovy povysheniya urovnya funktsionirovaniya sel'skokhozyaystvennykh agregatov [The mechanic-technological foundations for increasing the level of functioning of agricultural units]. Rostov n/D: Izd-vo ООО «Терра Принт» Publ., 2006. 304 p.