

УДК 629.1

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ  
НИЗКОЧАСТОТНЫХ СЛУЧАЙНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ И ПЛАВНОСТИ ХОДА  
КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Подрубалов Максим Валерьевич

к.т.н., доцент

РИНЦ SPIN-код: 5615-7361

[podrubalov@mgul.ac.ru](mailto:podrubalov@mgul.ac.ru)*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-  
я Институтская, д. 1*

Клубничкин Евгений Евгеньевич

к.т.н., доцент

Scopus Author ID: 57203352852

РИНЦ SPIN-код: 8158-0700

[klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru)*Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-  
я Институтская, д. 1*

В данной работе рассмотрены методики оценивания низкочастотных колебаний и плавности хода колёсных лесных и сельскохозяйственных машин. Достоинства и недостатки данных методик. Приведены оценки зависимостей скорости движения, загрузки заднего моста, давления в шинах передних задних колес от низкочастотных колебаний на сиденье человека оператора. Приведены результаты снижения низкочастотной вибрации только от поддресоренного сиденья. Приведены рекомендации для оценки низкочастотной вибрации для лесной и сельскохозяйственной техники

Ключевые слова: МИКРО ПРОФИЛЬ,  
НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ,  
ПЛАВНОСТЬ ХОДА, ВИБРАЦИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-173-018>

UDC 629.1

05.20.01 - Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

**REVIEW OF STUDIES OF LOW-FREQUENCY  
RANDOM OSCILLATIONS AND SMOOTH  
RUNNING OF WHEELED VEHICLES**

Podrubalov Maxim Valeryevich

Cand.Tech.Sci., assistant professor

RSCI SPIN-code: 5615-7361

[podrubalov@mgul.ac.ru](mailto:podrubalov@mgul.ac.ru)*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical  
University, Russia, 141005, Moscow region,  
Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

Klubnichkin Evgeny Evgenievich

Cand.Tech.Sci., assistant professor

Scopus Author ID: 57203352852

RSCI SPIN-code: 8158-0700

[klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru)*Mytishchi branch Bauman Moscow State Technical  
University, Russia, 141005, Moscow region,  
Mytishchi, 1-ya Institutskaya, 1*

In this article, we consider methods for evaluating low-frequency vibrations and smooth running of wheeled forest and agricultural machines, as well as advantages and disadvantages of these methods. This work estimates the dependencies of the speed of movement, the loading of the rear axle, the tire pressure of the front rear wheels on low-frequency vibrations on the seat of the human operator are given. The results of reducing the low-frequency vibration only from the sprung seat are presented. We have also included recommendations for the evaluation of low-frequency vibration for forest and agricultural machinery

Keywords: MICRO PROFILE,  
LOW-FREQUENCY  
VIBRATIONS, SMOOTH RUNNING, VIBRATION

**Введение.** В последние десятилетия появились глубокие теоретические и экспериментальные исследования, посвященные низкочастотным колебаниям и плавности хода тракторов. Проблеме плавности хода лесных и сельскохозяйственных тракторов уделяют значительное внимание, как в нашей стране, так и за рубежом. Сложность

этой проблемы очевидна и практически к ней возвращаются каждый раз, когда дело идет к созданию нового типа трактора или меняется диапазон рабочих скоростей движения лесных и сельскохозяйственных агрегатов, либо условия их работы.

При выполнении трактором технологических и транспортных операций на ходовую систему действуют различные силы и моменты, которые из-за разнообразных возмущающих воздействий передаются на остов трактора через его подвеску. Эти силы и моменты, действующие на остов трактора, сводить к трем составляющим: вертикальной, продольной, поперечной или боковой. Они и определяют интенсивность колебаний подрессоренных частей трактора [1, 2, 3].

#### **Теоретические и экспериментальные исследования.**

Теоретические и экспериментальные исследования низкочастотных случайных колебаний (НСК) колесного трактора ведутся в основном в следующих направлениях:

- теоретический анализ колебаний колесного трактора и его узлов;
- экспериментальное определение параметров подвески и сиденья;
- испытания тракторов с целью определения плавности хода.

Величина ускорений НСК трактора зависит в основном от следующих факторов:

- параметров микропрофиля поля или дороги;
- скорости движения тракторного агрегата;
- качества подрессоривания сиденья водителя;
- давления воздуха в шинах;
- подрессоривания и жесткости упругих элементов переднего моста;
- подрессоривания заднего моста;
- места установки сиденья водителя на тракторе;
- воздействия лесной или сельскохозяйственной машины.

Работа лесных и сельскохозяйственных машин в реальных условиях сопровождается интенсивными колебаниями, возникающими под влиянием различных факторов, главным из которых является внешнее воздействие со стороны микропрофиля поля. Неровности профиля пути как по высоте, так и по длине с течением времени изменяются случайно и в совокупности составляют микропрофиль, который может быть описан случайной функцией.

Параметры микропрофилей полей и дорог показывают, что с увеличением высот неровностей микропрофиля полей и дорог, т.е. величины дисперсии, наблюдается рост НСК трактора при любых скоростях движения [1, 2, 3].

Оценка качества систем подвески проектируемых лесных тракторов и сельскохозяйственных машин основывается на проведении теоретических и экспериментальных исследований колебаний остова при движении его по неровностям поля или дороги. При этом одним из наиболее важных вопросов является выбор расчетных вариантов воздействий неровностей пути на подвеску, зависящих от скорости движения машины, формы и размеров неровностей и других факторов [1, 2].

При повышении скорости движения интенсивность НСК трактора возрастает. Наибольшая интенсивность их для трактора класса 1.5 отмечается при частотах 3...4 Гц при скорости движения 11...13 км/ч. Установлено, что у трактора без лесной и сельскохозяйственной навески имеется прямолинейная зависимость между величинами среднеквадратичных ускорений и скоростью движения. Прирост ускорений составляет 28,3% на 1 км/ч. Отмечается возрастание продольно-горизонтальных ускорений остова трактора при повышении скорости движения [1, 2].

При движении по неровности на неподрессоренных тракторах рост НСК определяется двумя факторами: приближением к зоне резонанса и

ростом интенсивности колебаний за счет отрывов колес от дороги и ударов их при встрече с неровностями. «Условный» резонанс вертикального ускорения над задней осью остова трактора получается при скорости 10 км/ч. При увеличении скорости движения трактора выше резонансного значения вертикальные ускорения заднего моста уменьшаются в интервале скоростей 11 - 15 км/ч. При дальнейшем повышении скорости движения параметры НСК снова возрастают, и это вызывает болезненные ощущения и быстро утомляет тракториста [1].

Величина давления воздуха в шинах трактора значительно влияет на частоту собственных колебаний трактора и жесткость шин. При увеличении давления в задних шинах трактора 4x4 класса 1,5 тонны от 80 до 150 кПа жесткость их возрастает приблизительно на 40%, а частота собственных колебаний на 20% [1]. Наблюдалось неравномерное увеличение ускорений вертикальных колебаний по мере увеличения давления в шинах. Наибольшая интенсивность нарастания ускорения соответствовала давлению 100...130 кПа. При этих давлениях частота вынужденных колебаний наиболее близка к частоте собственных колебаний трактора, что приводит к резонансу и увеличению амплитуды и ускорения вертикальных колебаний. Увеличение давления приводит к увеличению частоты собственных колебаний и величины ускорений на рабочем месте тракториста. При испытаниях на искусственных неровностях со скоростью движения 10 км/ч наименьшие низкочастотные колебания показал трактор с давлением воздуха в шинах 80 и 120 кПа соответственно для передних и задних шин. Снижение ускорений остова составляет 5...24%. Учитывая, что диапазон давлений воздуха в шинах в условиях эксплуатации лежит в узких пределах, достигнуть значительного снижения уровня вертикальных колебаний с изменением давления в шинах нет возможности.

Одним из способов снижения колебаний трактора является подрессоривание мостов трактора. С уменьшением жесткости передней подвески трактора снижаются вертикальные ускорения передней части остова трактора, но на вертикальные ускорения в зоне сиденья тракториста это мероприятие не оказывает существенного влияния. Величина ускорений снижается от 2...4% до 10%. Подрессоривание переднего моста трактора класса 1,5 усиливает колебания заднего моста трактора в области низкочастотного резонанса и в зоне повышенных скоростей ( $v \geq 3,2$  м/с) и снижает в послерезонансной зоне ( $v = 1,8...3,2$  м/с). Предлагается обеспечить жесткость передней подвески  $S_{пр} = 300$  кг/см [1].

В ряде зарубежных стран также ведутся работы по подрессориванию обоих мостов тракторов. В Италии выпускается трактор "КЭСТ-430Л" с независимой торсионной подвеской всех колес и гидравлическими амортизаторам двухстороннего действия.

Известны экспериментальные работы в США по подрессориванию заднего моста трактора [4]. Результаты испытания данного способа подрессоривания подтверждают его эффективность. Величина ускорений остова трактора снизилась примерно в 2 раза. В Германии проведены опыты по применению упругих резиновых элементов для подрессоривания передней подвески тракторов. Основные преимущества данной подвески - высокая энергоемкость при малой массе и простота конструкции. Наряду с переменной характеристикой подвеска имеет ряд недостатков - наличие остаточной деформации под воздействием нагрузки, а также чувствительность к низким температурам и смазочным материалам [4].

В настоящее время также применяются на тракторах пневматических, гидропневматических и гидравлических подвесок. Данные виды подвесок обладают рядом существенных преимуществ: низкой жесткостью, автоматическим изменением жесткости в зависимости от статических и динамических нагрузок, большой удельной

энергоемкостью при малой массе. Данные виды подвесок обеспечивают постоянную частоту собственных колебаний трактора при различных нагрузках, горизонтальное положение остова трактора и возможность изменения дорожного просвета. Применение таких подвесок исключает использование демпферов [4].

**Задачи подрессоривания.** Для снижения уровня ускорений НСК, действующих на тракториста, частым решением является подрессоривание сиденья тракториста. Задачей подрессоривания сиденья является снижение частоты колебаний сиденья по сравнению с частотой колебаний заднего моста и быстрое гашение возникших колебаний. Подвеска подрессоренного сиденья тракториста снижает только вертикальные колебания остова трактора в 1,2...1,5 раза в частотном диапазоне 2,5...6,0 Гц, одновременно из-за конструкции подвески в 1,3...2,1 раза возрастают НСК в продольном направлении. Регулировка подвески тракторного сиденья, несоответствующая массе водителя, приводит к увеличению ускорений НСК подушки сиденья в 1,7...2,4 раза и повышению частоты резонансных колебаний. Оптимальная жесткость подвески сиденья трактора МТЗ-80, определенная экспериментально, составляет 12...13 кН/м при массе водителя 70 кг [5].

Подрессоривание сиденья трактористов делят на системы: с пассивным подрессоренным и с активным гашением колебаний [1, 2]. Система пассивного подрессоривания сиденья состоит из упругих элементов и гасителя (амортизатора) колебаний сиденья. Все известные сиденья на тракторах приспособлены к гашению только вертикальных колебаний.

**Методика моделирования.** Разработана методика моделирования НСК имеющих место на раме трактора, позволяющая более точно оценить виброзащитные свойства подрессоренных сидений [6].

Упругая подвеска сиденья не может обеспечить в обычных режимах работ снижения ускорений до предельно допустимого уровня. Введение сидений с упругой подвеской на лесной и сельскохозяйственной техники позволило снизить уровень ускорений на 30...35% [1]. Защита тракториста может быть обеспечена за счет введения рациональной подвески сиденья. Доказывается, что пассивные подвески не обеспечивают требуемого снижения уровня колебаний.

На сиденье тракториста появляются вследствие воздействия возмущающих факторов. Эти факторы можно по частоте разделить на следующие:

- условно низкочастотные случайные, с частотой около 1 Гц зависящие от микропрофиля;
- условно высокочастотные периодические, с частотами до 14 Гц, возникающие на остове и зависящие от цевочного зацепления.

Для снижения уровня вертикальных колебаний, действующих на человека-оператора во всем диапазоне частот, особенно на частотах до 2 Гц, в нашей стране и за рубежом разработаны сиденья с активным снижением низкочастотных колебаний. Применение данной системы для поддрессоривания сиденья машино-тракторного агрегата исключает многие недостатки пассивных систем и позволяет получить низкую частоту собственных колебаний сиденья и минимальные ускорения на сиденье водителя оператора. Для этого применена поршневая пара с гидроприводом, удерживавшим сиденье на постоянной высоте, независимо от колебаний остова трактора. Увеличение горизонтально - продольной нагрузки на трактор вызывает загрузку задних и разгрузку передних колес. Увеличение загрузки задних колес при малых частотах воздействия снижает уровень колебаний на рабочем месте тракториста. Разгрузка передних колес вызывает возрастание интенсивности колебаний передней части остова трактора, но так как при увеличении крюковой нагрузки

скорость трактора падает, происходит общее снижение интенсивности колебаний тракторного агрегата [2].

Влияние рабочего орудия на колебания остова трактора учитывать приложением главного момента и главного вектора сил взаимодействия трактора с рабочим орудием. При этом следует иметь в виду, что силы взаимодействия зависят не только от параметров рабочего орудия, но и от параметров трактора. Поэтому, если параметры трактора изменяются в небольших пределах, то практически достаточно определить для данного класса тракторов эти силы и далее считать, что они будут одинаковыми.

**Выводы.** Расчетным путем получено влияние неравномерности тягового сопротивления рабочего орудия на вертикальные колебания трактора, которое составляет всего 11% [1] от колебаний остова трактора, вызванных неровностями поля. Поэтому автор предлагает при расчете колебаний тракторов неравномерностью тягового сопротивления пренебречь.

Автор предлагает силовое воздействие лесных и сельскохозяйственных машин на трактор рассматривать в виде постоянной средней величины. Такой подход дает возможность рассматривать трактор как колесную машину, которая подвергается воздействию только со стороны неровностей дороги. Вес такой машины, приведенный к ее опорам, следует взять больше или меньше веса действительного трактора на величину воздействия машины.

**Благодарности:** *Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.*

## Литература

1. Подрубалов В.К. Статистическая оптимизация параметров системы поддресоривания универсально-пропашного трактора (на примере трактора класса 2 со всеми одинаковыми колесами). Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.05.03 / Научн.-произв. об-ние по тракторостроению. - Москва, 1987. - 246 с.

2. Подрубалов М.В. Совершенствование виброзащиты оператора транспортного мотоблока в системе малой механизации лесохозяйственной и лесопарковой деятельности. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. ФГБУ ВПО МГУЛ. - Москва, 2012. - 164 с.

3. Подрубалов М.В. Методы получения и спектральный анализ вибрационных характеристик искусственных треков. / М.В. Подрубалов, В.К. Подрубалов // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. № 2(14), Том 1, М., МГТУ «МАМИ», 2012, С. 303-310.

4. Уткик-Любавцов О.Л., Волошин С.Л. О направлении работ по исследованию динамики колесных тракторов. - Труды НАТИ, 1973 вып. 223, с. 3-9.

5. Пунцулис П.А. Повышение производительности сельскохозяйственных транспортных агрегатов путем снижения низкочастотных колебаний рабочих мест трактористов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.20.01. - Елгава, 1979. - 278 с.

6. Подрубалов М.В. Обобщенная математическая модель вибронгруженности мобильной машины при случайном кинематическом возбуждении. / М.В. Подрубалов, В.К. Подрубалов, А.Н. Никитенко // Известия МГТУ «МАМИ» № 2(16), Том 1, М., МГТУ «МАМИ», 2013, С. 203-212.

## References

1. Podrubalov V.K. Statisticheskaja optimizacija parametrov sistemy podressorivanija universal'no-propashnogo traktora (na primere traktora klassa 2 so vsemi odinakovymi kolesami). Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk: 05.05.03 / Nauchn.-proizv. ob-nie po traktorostroeniju. - Moskva, 1987. - 246 s.

2. Podrubalov M.V. Sovershenstvovanie vibrozashhity operatora transportnogo motobloka v sisteme maloj mehanizacii lesohozjajstvennoj i lesoparkovoj dejatel'nosti. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. FGBU VPO MGUL. - Moskva, 2012. - 164 s.

3. Podrubalov M.V. Metody poluchenija i spektral'nyj analiz vibracionnyh harakteristik iskusstvennyh trekov. / M.V. Podrubalov, V.K. Podrubalov // Izvestija MGTU «MAMI». Nauchnyj recenziruemyj zhurnal. № 2(14), Tom 1, M., MGTU «MAMI», 2012, S. 303-310.

4. Utkik-Ljubavcov O.L., Voloshin S.L. O napravlenii rabot po issledovaniju dinamiki kolesnyh traktorov. - Trudy NATI, 1973 vyp. 223, s. 3-9.

5. Punculis P.A. Povyshenie proizvoditel'nosti sel'skohozjajstvennyh transportnyh agregatov putem snizhenija nizkochastotnyh kolebanij rabochih mest traktoristov: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk: 05.20.01. - Elgava, 1979. - 278 s.

6. Podrubalov M.V. Obobshhennaja matematicheskaja model' vibronagruzhenosti mobil'noj mashiny pri sluchajnom kinematičeskom vozbužhdenii. / M.V. Podrubalov, V.K. Podrubalov, A.N. Nikitenko // Izvestija MGTU «MAMI» № 2(16), Tom 1, M., MGTU «MAMI», 2013, S. 203-212.