

где b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, учитывающие жесткостные характеристики стержня; m_1 – инерционный член.

Решение для прогиба будем искать в виде

$$w(x, t) = T(t)W(x).$$

В результате получим два уравнения в одной переменной:

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega^2 T = 0; \quad \frac{d^4 W}{dx^4} - \lambda^4 W = 0, \quad (1)$$

где ω – частота собственных колебаний; λ – собственное число.

Первое уравнение из (1) имеет следующее решение:

$$T(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t),$$

где A и B – константы интегрирования, определяемые из начальных условий.

Второе дифференциальное уравнение (1) для координатной функции имеет постоянные коэффициенты. Общее решение уравнения:

$$W(x) = C_1 \operatorname{ch}(\lambda x) + C_2 \operatorname{sh}(\lambda x) + C_3 \cos(\lambda x) + C_4 \sin(\lambda x).$$

Коэффициенты C_1 – C_4 определяются из граничных условий.

Получены решения для прогибов и частот свободных колебаний при различных условиях закрепления торцов стержня.

Список литературы

- 1 **Леоненко, Д. В.** Исследование спектра частот трехслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
- 2 **Sherif, H. A.** Non-linear forced flexural vibration of a clamped circular unsymmetrical sandwich plate / H. A. Sherif // *Journ. of Sound and Vibr.* – 1995. – Vol. 182, no. 3. – P. 495–503.
- 3 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойного стержня в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2013. – № 1 (22). – С. 31–35.
- 4 **Воробьев, С. А.** Частотные характеристики трехслойного стержня с учетом внутреннего трения на основе вязкой и комплексной моделей / С. А. Воробьев // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 12–16.
- 5 **Леоненко, Д. В.** Собственные колебания трехслойного стержня на упругом основании / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // *Прикладная механика*. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 37–46.
- 6 **Lee, J. W.** Free vibration analysis of three layered beams with a soft-core using the transfer matrix method / J. W. Lee // *Applied Sciences*. – 2023. – No. 13. – P. 411.
- 7 **Khdeir, A. A.** Free vibration of sandwich beams with soft core / A. A. Khdeir, O. J. Aldraihem // *Composite Structures*. – 2016. – No. 154. – P. 179–189.
- 8 **Yildirim, S.** Free vibration analysis of sandwich beams with functionally-graded-cores by complementary functions method / S. Yildirim // *AIAA Journal*. – 2020. – No. 58. – P. 5431–5439.

УДК 629.3.015.5

АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СИДЕНЬЯ ВОДИТЕЛЯ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Д. А. ЛИННИК, А. Ч. СВИСТУН, Е. В. ОВЧИННИКОВ

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Республика Беларусь

Для обеспечения безопасных и комфортных условий труда водителей сельскохозяйственной техники предъявляются все более высокие требования к эффективности работы. Как показывает практика, экономический результат, получаемый от внедрения новых технических решений систем подвески, обычно не оправдывает финансовых затрат на их разработку. Однако практика использования сельскохозяйственной техники показывает, что отсутствие комфортных условий труда водителя как прямо, так и косвенно влияет на технико-экономические показатели использования машины. При больших амплитудах колебаний сиденья водитель вынужден снижать скорость сельскохозяйственной машины, что сопровождается снижением средней линейной скорости и, как следствие, приводит к падению производительности работы машины. Высокий уровень вибрации на рабочем месте водителя влияет на его здоровье, вызывая утомляемость и потерю концентрации [1].

Водители сельскохозяйственных машин в своей повседневной работе подвергаются множеству негативных воздействий, которые оказывают сложное и опасное воздействие на организм. Помимо физических нагрузок, осадков, неблагоприятного микроклимата, различных загрязнений (пыль, средства защиты растений), высоких или низких температур, шума существенным вредным фактором являются низко- и высокочастотные вибрации. Эти вибрации особенно влияют на водителей колесных тракторов, поскольку они передаются через раму, пол кабины, сиденье и органы управления на все тело водителя [2–4].

Частоты в диапазоне от 1 до 7 Гц играют ведущую роль в возникновении рисков опорно-двигательного аппарата, особенно в поясничном отделе позвоночника. Эти нарушения встречались преимущественно у водителей колесных тракторов из-за высокой амплитуды воздействия низкочастотной вибрации. Для предупреждения и предотвращения влияния общих вибраций на здоровье водителей колесных тракторов и других сельскохозяйственных машин необходимо обеспечить безопасность труда и сохранить здоровье водителей [4–6].

В последнее время системы виброзащиты изучаются достаточно широко. Системы виброзащиты можно разделить на пассивные, активные и полуактивные. Полуактивные системы управления заполняют пробел между пассивными и активными системами управления и представляют собой компромисс между повышением производительности и простотой реализации. Разработка таких систем поддрессирования требует комплексных исследований и анализа характера возмущающего воздействия на машину в условиях сельскохозяйственного производства, исследования и поиск путей снижения вибронгрузки рабочего места водителя сельскохозяйственных машин [1].

Математические модели находят широкое применение в различных сферах современной науки, таких как физика, техника, биология, экономика, социология и т. д. Они служат для описания, исследования и упрощения сложных систем, анализа их поведения, выявления взаимосвязей между параметрами и поиска оптимальных решений. Кроме того, модели позволяют на этапах раннего проектирования определить оптимальные параметры [7–9].

В работе [10] изложены результаты решения основного уравнения динамики с нулевыми начальными условиями колебания сиденья водителя колесного трактора «Беларус-3022ДЦ.1» при движении по неровностям опорной поверхности под действием возмущающей силы, силы трения, силы сопротивления амортизатора и силы тяжести. Произведена оценка оптимальных конструктивных параметров системы поддрессирования сиденья водителя с целью снижения величины вибрации на рабочем месте водителя колесного трактора.

Из рисунка 1 видно, что из-за действия возмущающей периодической силы (например, движение происходит по опорной поверхности с правильной волнистой поверхностью), колебания с собственными частотами в течение короткого промежутка времени затухают (из рисунка 1, *б* видно, что время установления составляет десятые доли секунды) и остаются лишь колебания, обусловленные действием возмущающей силы. Данные колебания совершаются с частотой возмущающей силы и с постоянной амплитудой и являются установившимися вынужденными колебаниями. Однако из рисунка 1, *а* видно, что эти колебания сиденья водителя не симметричны относительно нуля (начального положения сиденья).

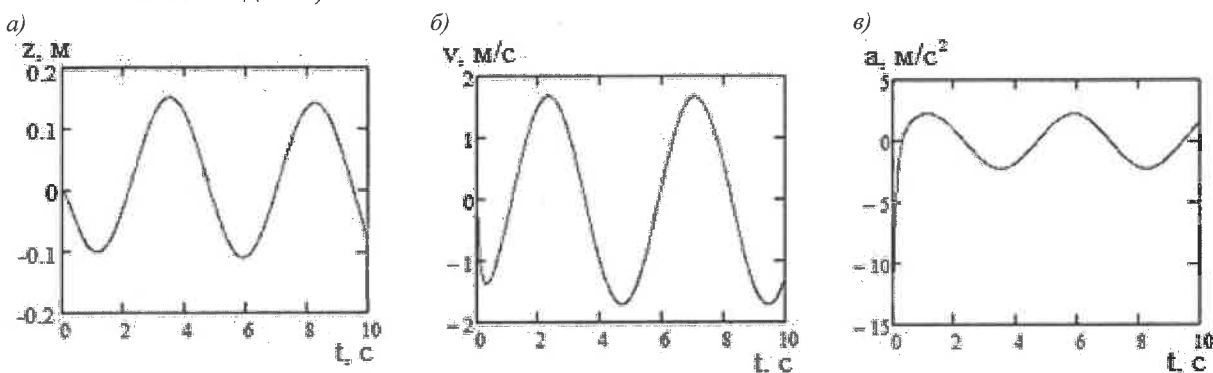


Рисунок 1 – Зависимость перемещения сиденья водителя 80-6800010 (*а*), скорости движения (*б*), ускорения (*в*) от времени

При передвижении колесного трактора по неровностям опорной поверхности часто возникают колебания с различными частотами, которые могут быть как неустановившимися, так и вынужден-

ными вибрационными частотами. Однако из-за оптимального выбора параметров и конструкции сиденья в [10] наблюдаются установившиеся вынужденные колебания.

Список литературы

- 1 **Kravchenko, V.** On the assessment of vibroloading of vehicle drivers in agricultural production / V. Kravchenko, L. Kravchenko, V. Oberemok // State and prospects for the development of agribusiness – INTERAGROMASH 2020 : XIII International scientific and practical conference ». – 2020. – Vol. 175. – P. 1–10.
- 2 **Cvetanovic, B.** Evaluation of whole-body vibration risk in agricultural tractor drivers / B. Cvetanovic, D. Zlatkovic // Bulgarian Journal of Agricultural Science. – 2013. – Vol. 19 (5). – P. 1155–1160.
- 3 **Линник, Д. А.** Оценка эффективности существующей системы виброзащиты рабочего места водителя колесного трактора при выполнении полевых работ / Д. А. Линник // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 2. – С. 161–166.
- 4 Investigation of the vibrations transmitted by agricultural tractor to the driver under operative conditions / L. Fornaciari [et al.] // Innovation Technology to Empower Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-food Systems : International Conf., Ragusa, 15–17 Sept. 2008. – Italy, 2008. – P. 1–8.
- 5 Whole body vibration exposure among the tractor operator during soil tillage operation : an evaluation using ISO 2631-5 standard / A. Singh [et al.] // Shock and Vibration. – 2022. – P. 1–8.
- 6 **Cutini, M.** Whole-body vibration in farming : background document for creating a simplified procedure to determine agricultural tractor vibration comfort / M. Cutini, M. Brambilla, C. Bisaglia // Agriculture. – 2017. – Vol. 7, is. 84. – P. 20.
- 7 **Линник, Д. А.** Математическая модель и программа моделирования колебаний масс колесного трактора с подремонтированной кабиной / Д. А. Линник, В. И. Булгаков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 2. – С. 122–127.
- 8 **Линник, Д. А.** Математическая модель опытного демпфера подвески кабины колесного трактора / Д. А. Линник, В. М. Пецевич, А. Ч. Свистун // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 2. – С. 139–143.
- 9 **Мусафиров, Э. В.** Математическая модель колебаний сиденья водителя колесного трактора / Э. В. Мусафиров, Д. А. Линник, А. Ч. Свистун // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 64–75.
- 10 **Линник, Д. А.** К вопросу оценки вертикальных колебаний сиденья водителя при движении колесного трактора по неровностям опорной поверхности / Д. А. Линник, А. Ч. Свистун // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 3. – С. 112–119.

УДК 551.461

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

А. И. ЛИСТОПАД, А. И. КИРИЛЕНКО

Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

Тенденция развития беспилотных летательных аппаратов (БЛА) направлена на всепогодность. Основной особенностью БЛА является их использование преимущественно в приземном слое атмосферы, где идут конвективные восходящие потоки. Этот слой наиболее подвержен влиянию процессов, происходящих на земной поверхности. В этом слое можно наблюдать существенное изменение метеозаменителей с высотой, но самое главное – они могут изменяться во времени. Например, вертикальный градиент скорости ветра, температура и влажность способны в несколько раз превышать свои показатели по отношению к вышележащим слоям. В силу небольших габаритов и относительно небольшого веса большинство моделей БЛА весьма чувствительны к изменениям скорости ветра и его порывам. В приземном слое атмосферы скорость ветра с высотой возрастает, однако наблюдается отсутствие изменения его направления [1]. Также на высоте от земли до 5 км содержится большая часть водяного пара атмосферы (порядка 90 %), именно поэтому в приземном слое происходят процессы, связанные с образованием облаков и осадков (дождя, снега, града). Физика этих явлений не изучена. Поэтому изучение влияния метеофакторов на полеты в приземном слое атмосферы весьма актуально. Одной из особенностей приземного слоя атмосферы является переменчивость вектора скорости воздушных масс. В условиях турбулентности вектор скорости частиц воздуха меняется хаотично в пространстве и во времени. Именно от параметров турбулентности зависят такие характеристики состояния воздушных масс, как температура, давление, влажность, плотность.

Цель работы – проанализировать климатические факторы, определяющие пределы использования БЛА в различных погодных условиях.