

Д.М. Ласточкин, Ю.Н. Сидыганов, В.И. Кретинин, А.А. Медяков

**АНАЛИЗ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ
ВЕРТИКАЛЬНО УДЕРЖИВАЕМОГО ДЕРЕВА
НА ВИБРОПОДВЕСЕ**

Введение. Для уменьшения негативного воздействия лесозаготовок на лесную среду некоторые технологии рубок ухода предполагают вертикальный вынос срезанного дерева из лесосеки лесозаготовительной машиной [Жуков и др., 1997; Сидыганов и др., 2008; Lastochkin et al., 2017]. Удержание дерева в вертикальном положении при этом происходит или за счет жестких связей и массогабаритных параметров базового трактора, или за счет применения системы автоматической стабилизации.

Технология валки леса, при которой дерево удерживается в вертикальном положении за счет преобладающей массы базовой машины, в практике лесозаготовок достаточно распространена и известна [Андронов и др., 2022]. А вот система автоматической стабилизации вертикально удерживаемого дерева, компенсирующая внешние возмущающие воздействия, из-за своего несовершенства не получила практического применения, что говорит нам о необходимости дополнительного изучения данного вопроса и поиска соответствующих новых решений [Сидыганов и др., 2011]. Поэтому в рамках поискового научного исследования был рассмотрен вопрос удержания дерева в вертикальном положении за счет эффекта динамической стабилизации перевернутого маятника на осциллирующем подвесе. В основе исследования были использованы разработки, при которых устанавливалась связь верхнего предела устойчивости перевернутого маятника с потерей устойчивости нижнего положения [Бутиков, 2010].

Целью работы является анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе при варьировании значений высоты дерева и амплитуды колебаний, позволяющий определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость.

Материалы и методика исследования. Удерживаемое в вертикальном положении дерево из-за своих физических свойств является довольно сложной системой, и для эффективного исследования его динамических параметров целесообразна определенная идеализация. Поэтому исследова-

ние динамической стабилизации вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе было рассмотрено через анализ механических систем в виде математического и физического перевернутых маятников.

Определение условий динамической стабилизации на виброподвесе срезанного дерева в вертикальном положении было основано на известном условии, при котором момент силы инерции, действующий на отклоненный из перевернутого положения маятник, превосходит момент силы тяжести, стремящийся привести маятник в нижнее положение [Бутиков, 2010]:

$$a^2\omega^2 > 2gL, \quad (1)$$

где a – амплитуда колебаний; ω – частота колебаний; g – ускорение свободного падения; L – длина перевернутого маятника.

Данное выражение нам показывает, что вертикальное положение перевернутого математического маятника устойчиво, если максимальная скорость ωa осциллирующей оси больше, чем скорость $\sqrt{2gL}$, которую маятник, свободно падающий в поле тяжести, приобретает при падении с высоты, равной длине центра тяжести маятника.

Результаты исследования. В первом варианте при максимальной идеализации вертикально удерживаемое дерево было представлено в виде математического маятника, где вся его масса сосредоточена в центре тяжести дерева. При этом одной из характеристик, описывающих динамическую устойчивость вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе, является частота его колебаний, которая, исходя из выражения (1), должна удовлетворять следующему условию:

$$\omega = \frac{\sqrt{2gL}}{a}. \quad (2)$$

Основываясь на варианте вибропривода захватно-срезающего устройства, который был ранее проработан авторами данного исследования, максимальную амплитуду колебания a вертикально удерживаемого дерева примем равной 0,4 м [Lastochkin et al., 2023].

Длина L для расчета будет равна высоте центра тяжести дерева $h_{\text{цт}}$, которую в зависимости от породы дерева можно определить по следующему выражению [Жуков и др., 2001]:

$$h_{\text{цт}} = k \cdot h_{\text{д}}, \quad (3)$$

где $h_{\text{цт}}$ – высота центра тяжести дерева; $h_{\text{д}}$ – высота дерева; k – коэффициент, равный для сосны – 0,37; березы и осины – 0,36; ели – 0,4.

Высоту деревьев, вырубаемых на рубках ухода в европейской части России, зададим для расчета от 6 до 18 м.

Подставляя заданные параметры амплитуды колебаний и высоты центра тяжести дерева в формулу (2), получим результаты минимально необходимой частоты колебаний для деревьев различной высоты (рис. 1) при динамическом удержании вертикального дерева в виде математического маятника.

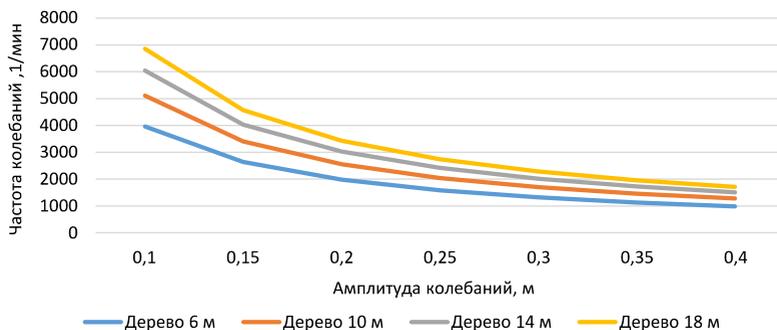


Рис. 1. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) в виде математического маятника

Fig. 1. Graphs of the minimum required vibration frequency of a tree (pine) in the form of a mathematical pendulum

Из результатов видно, что минимально необходимая частота колебаний вертикально удерживаемого дерева соответствует максимальной амплитуде. Так при амплитуде 0,4 м для сосны высотой от 6 до 18 м минимально необходимая частота колебаний будет составлять от 16,5 до 28,5 Гц. Отдельно сравнивая результаты частот колебаний для сосны, ели и березы, можно сказать, что максимальные отклонения не превышают 5,5%.

Во втором варианте дерево представили в виде физического маятника, имеющего известную длину, массу и момент инерции. В качестве длины маятника L в выражении (1) использовали приведенную длину физического маятника [Панченко и др., 2018]:

$$L = \frac{I}{ml}, \quad (4)$$

где I – момент инерции относительно оси вращения, m – масса стержня и l – длина стержня.

Если подставить данные физического маятника (4) в формулу (2), выражение необходимой частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева в виде физического маятника будет иметь следующий вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{2gl}{mla^2}}. \quad (5)$$

В первоначальном расчете вертикального дерева в виде физического маятника приняли, что масса кроны компенсирует неравномерность распределения массы ствола у вершины дерева. Поэтому более равномерное распределение массы ствола и вершины дерева по высоте позволило идеализировать его до однородного стержня.

Момент инерции прямого однородного стержня длиной l и массой m , где ось перпендикулярна к стержню и проходит через его конец, с учетом теоремы Гюйгенса – Штейнера имеет следующий вид [Панченко и др., 2018]:

$$I = \frac{1}{3}ml^2. \quad (6)$$

Тогда формула необходимой частоты колебания динамически удерживаемого вертикально дерева в виде однородного стержня с равномерно распределенной массой будет иметь следующий вид:

$$\omega > \sqrt{\frac{2gl}{3a^2}}. \quad (7)$$

Подставляя заданные параметры варьирования в формулу (7), получаем значения минимально необходимой частоты колебаний вертикального дерева в виде однородного стержня с равномерно распределенной массой (рис. 2).

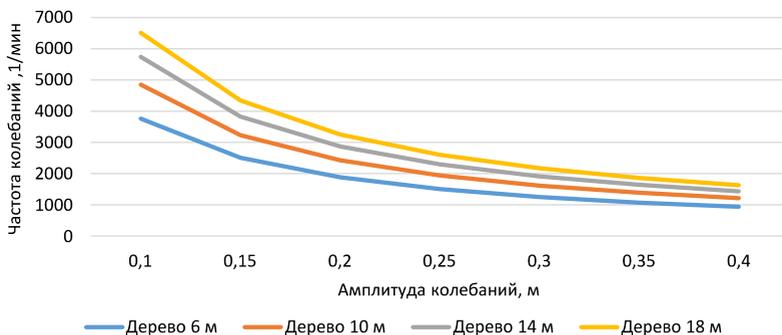


Рис. 2. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) на основе физического маятника в виде однородного стержня

Fig. 2. Minimum required vibration frequencies of wood (pine) based on a physical pendulum in the form of a homogeneous rod

Из графика (рис. 2) видно, что при расчете частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева разной высоты в виде однородного стержня при максимальной амплитуде колебаний 0,4 м частота варьируется от 15,6 Гц до 27, 1 Гц, что почти на 5,5% меньше, чем при расчете для математического маятника.

В другом случае для расчета физического маятника был взят известный момент инерции дерева при валке относительно спила [Жуков и др., 2001]:

$$I = (0,21 \dots 0,22) \cdot m_d \cdot h_d^2, \quad (8)$$

где m_d – масса дерева, h_d – высота дерева.

Тогда выражение необходимой частоты колебания (5) динамически удерживаемого дерева в вертикальном положении на основе известного момента инерции относительно спила будет иметь следующий вид:

$$\omega = \frac{\sqrt{0,41gh_d}}{a}. \quad (9)$$

Визуальное представление результатов расчета минимально необходимой частоты колебаний дерева на основе известного момента инерции при валке относительно спила представлено на рис. 3.

График на рис. 3 показывает, что значения частот колебаний на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спила для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц. Данный расчет позволил сократить на 21% значение частоты колебаний по сравнению с физическим маятником в виде однородного стержня.

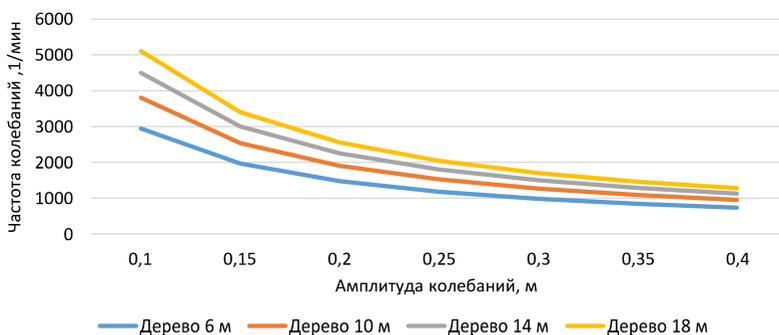


Рис. 3. Минимально необходимые частоты колебаний дерева (сосна) на основе физического маятника с известным моментом инерции при валке относительно спила

Fig. 3. Minimum required vibration frequencies of a tree (pine) based on a physical pendulum with a known moment of inertia when felling relative to the cut

Выводы. Проведен анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе при варьировании значений высоты дерева и амплитуды колебаний, позволяющий определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость.

Проведенный анализ частоты колебаний деревьев различной высоты показал, что минимальные значения дает расчет, выполненный на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спиля. Например, для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 значения минимально необходимых колебаний варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц, что на 21% меньше значений, полученных в результате расчета на основе физического маятника в виде однородного стержня и на 26 % меньше значений, полученных в результате расчета на основе математического маятника.

Анализ графиков частоты колебаний показывает, что при амплитуде колебаний, начиная от 0,4 м и выше, разница частот колебаний деревьев различной высоты становится минимальной, и появляется возможность подбора на практике элементов вибропривода, при которых возможно реализовать принцип вертикального удержания дерева на осциллирующем подвесе для определенных параметров деревьев.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00421 «Обоснование конструкции и параметров узкозахватного навесного технологического оборудования с вибрирующим подвесом лесозаготовительной машины», <https://rscf.ru/project/23-29-00421/>».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Андронов А.В., Зверев И.А., Тюрина М.С., Тарадин Г.С., Михайлов О.А. Модели формирования основных параметров колесных узкозахватных валочно-пакетирующих машин фронтального типа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 184–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195

Бутиков Е.И. Стабилизация перевернутого маятника (60 лет маятнику Капицы) // Компьютерные инструменты в образовании. 2010. № 5. С. 39–51.

Жуков А.В., Асмоловский М.К., Мохов С.П. Эксплуатационные испытания узкозахватных валочных машин на рубках ухода // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 1997. № 5. С. 43–48.

Жуков А.В., Горонковский А.Р., Мохов С.П., Клоков Д.В. Определение основных параметров динамических систем «Лесная машина – предмет труда»: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2001. 48 с.

Панченко В.А., Дубровин В.С. Механика. Теоретическая механика, техническая механика: учеб. пособие. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2018. 191 с.

Патент 2010125781/21 РФ, Захватно-срезающее устройство №100874 / Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Ласточкин Д.М. Опубл. 10.01.2011. Бюл. № 1.

Патент 2023111991 РФ, Захватно-срезающее устройство №2810547 / Ласточкин Д.М., Медяков А.А., Осташенков А.П. Опубл. 27.12.2023. Бюл. № 36.

Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Ласточкин Д.М. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. 336 с.

Lastochkin D.M., Onuchin E.M., Medyakov A.A., Kostromin D.V., Ostashenkov A.P. Study of parameters of elements of a felling head for lifting and moving trees for the purpose of clearing agricultural lands and agroforestry // Journal of Applied Engineering Science. 2017. T.15. № 3. P. 247-257. DOI: 10.5937/jaes15-13713.

References

Andronov A.V., Zverev I.A., Tyurina M.S., Taradin G.S., Mikhailov O.A. Models for the formation of the main parameters of wheeled narrow-grip front-type feller bunchers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2022, iss. 241, pp. 184–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.241.184-195. (In Russ.)

Butikov E.I. Stabilization of an inverted pendulum (60 years of the Kapitza pendulum). *Computer tools in education*, 2010, no. 5, pp. 39–51. (In Russ.)

Lastochkin D.M., Onuchin E.M., Medyakov A.A., Kostromin D.V., Ostashenkov A.P. Study of parameters of elements of a felling head for lifting and moving trees for the purpose of clearing agricultural lands and agroforestry. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 247–257. DOI: 10.5937/jaes15-13713.

Panchenko V.A., Dubrovin V.S. Mechanics. Theoretical mechanics, technical mechanics: textbook. M.: Russian University of Transport (MIIT), 2018. 191 p. (In Russ.)

Patent 2010125781/21 RU, Zakhvatno-srezayushcheye ustroystv [Grabbing and cutting device] / Sidiganov Yu.N., Onuchin E.M., Lastochkin D.M. Publ. 10.01.2011; bul. no. 1. (In Russ.)

Patent 2023111991 RU, Zakhvatno-srezayushcheye ustroystv [Grabbing and cutting device]. / Lastochkin D.M., Medyakov A.A., Ostashenkov A.P. Publ. 27.12.2023; bul. no. 36. (In Russ.)

Sidiganov Yu.N., Onuchin E.M., Lastochkin D.M. Modular machines for thinning and reforestation: monograph. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2008. 336 p. (In Russ.)

Zhukov A.V., Asmolovskiy M.K., Mokhov S.P. Operational tests of narrow-cut felling machines on thinnings. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 2. Forestry and woodworking industry*, 1997, no. 5, pp. 43–48. (In Russ.)

Zhukov A.V., Goronovskiy A.R., Mokhov S.P., Klokov D.V. Determination of the main parameters of dynamic systems «Forestry machine – an object of labor»: textbook. Minsk: BSTU, 2001. 48 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 21.03.2024

Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретинин В.И., Медяков А.А. Анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева на виброподвесе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 220–229. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.220-229

В статье приводится анализ частоты колебаний вертикально удерживаемого дерева разной высоты на виброподвесе, который позволяет определить условия, при которых вертикальное дерево сохранит свою устойчивость. Были рассмотрены механические системы в виде математического и физического перевернутых маятников. В расчете при максимальной идеализации вся масса вертикально удерживаемого дерева была сосредоточена в его центре тяжести. В расчете на основе физического маятника в первом случае идеализация дерева была проведена в виде равномерного распределения массы ствола и вершины дерева по высоте, во втором случае рассматривалась система с известным моментом инерции дерева при валке относительно его спила. Проведенный анализ показал, что оптимальные значения частоты колебаний деревьев различной высоты – у системы на основе физического маятника с известным моментом инерции относительно спила. Например, для деревьев высотой от 6 до 18 м при максимальной амплитуде колебаний 0,4 значения минимально необходимых колебаний варьируются от 12,2 Гц до 21,2 Гц, что на 21% меньше значений расчета на основе физического маятника в виде однородного стержня или на 26 % меньше значений расчета системы на основе математического маятника. Также полученные графики частоты колебаний показывают, что при амплитуде колебаний начиная от 0,4 м и выше разница частоты колебаний деревьев различной высоты становится минимальной, и появляется возможность подбора на практике элементов вибропривода для деревьев различных параметров.

Ключевые слова: вертикальное дерево, динамическая стабилизация, вибропривод, осциллирующий подвес, перевернутый маятник.

Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Medyakov A.A. Analysis of the vibration frequency of a vertically held tree on a vibration suspension. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 220–229 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.220-229

The article provides an analysis of the vibration frequency of a vertically held tree of different heights on a vibrating suspension, which makes it possible to determine the conditions under which a vertical tree will retain its stability. Mechanical systems in the form of mathematical and physical inverted pendulums were considered. In the calculation, with maximum idealization, the entire mass of a vertically held tree was concentrated at its center of gravity. In the calculation based on a physical pendulum, in the first case, the idealization of the tree was carried out in the form of a uniform

distribution of the mass of the trunk and top of the tree along the height; in the second case, a system with a known moment of inertia of the tree when felling relative to its cut was considered. The analysis showed that the most optimal values of the oscillation frequency of trees of different heights are found in a system based on a physical pendulum with a known moment of inertia relative to the cut. For example, for trees with a height of 6 to 18 m with a maximum amplitude of oscillations of 0.4, the values of the minimum required oscillations vary from 12.2 Hz to 21.2 Hz, which is 21% less than the calculation values based on a physical pendulum in the form of a homogeneous rod or 26% less than the calculation values of the system based on a mathematical pendulum. Also, the obtained graphs of the vibration frequency show that with an amplitude of vibration starting from 0.4 m and above, the difference in the vibration frequency of trees of different heights becomes minimal, and it becomes possible to select in practice vibration drive elements for trees of different parameters.

Key words: vertical tree, dynamic stabilization, vibration drive, oscillating suspension, inverted pendulum.

ЛАСТОЧКИН Денис Михайлович – доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: lastochkindm@volgatech.net

LASTOCHKIN Denis M. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment Operation of the Volga State University of Technology. SPIN code: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: lastochkindm@volgatech.net

СИДЫГАНОВ Юрий Николаевич – профессор кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: SidyganovYN@volgatech.net

SIDIGANOV Yury N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Operation of Machines and Equipment of the Volga State Technological University. SPIN-код: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: SidyganovYN@volgatech.net

КРЕТИНИН Виктор Иванович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: KVI_1960@mail.ru

KRETININ Viktor I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Control in Technical Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: KVI_1960@mail.ru

МЕДЯКОВ Андрей Андреевич – заведующий кафедрой Энергообеспечения предприятий Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 5189-6826. ORCID: 0000-0002-7484-1422.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: MedyakovAA@volgatech.net

MEDYAKOV Andrey A. – PhD (Technical), Head of the Department of Energy Supply of Enterprises of the Volga State Technological University. SPIN code: 5189-6826. ORCID: 0000-0002-7484-1422.

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: MedyakovAA@volgatech.net