



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА КУСТОРЕЗА С ШЕСТЬЮ ЛЕЗВИЯМИ

Михаил В. Драпалюк¹ ✉, md@vglta.vrn.ru, 0000-0002-8029-2706

Леонид Д. Бухтояров¹, vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

Анастасия В. Придворова¹, anastasija.pridvorova@gmail.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Кусторезы используют в лесном хозяйстве для уходов за лесными культурами на операциях срезания нежелательной древесно-кустарниковой растительности (ДКР). В качестве рабочих органов могут быть использованы роторы. Рассматриваемый нами ротор представляет собой маховик, на внешних сторонах которого шарнирно закреплены лезвия. При срезании лезвиями ДКР возникает момент резания, который передается через нож на ось его вращения и далее на вал, приводящий в движение маховик. При проектировании конструкции кустореза воздействие от сил резания ДКР является определяющим для выбора мощности привода и параметров ротора. Для исследования процесса резания ДКР нами был спроектирован ротор кустореза в САПР Solidworks (заданы его геометрические и массовые параметры, установлены кинематические связи звеньев), в модуле Motion Solidworks были заданы входные характеристики движения и приложен момент резания к ножам. На модель были установлены виртуальные датчики для снятия характеристик движения. В результате проведения компьютерного эксперимента для трех вариантов, отличающихся силой резания и наличием демпфера, были установлены траектории движения ножей и затраты мощности привода.

Ключевые слова: кусторез, имитационное моделирование, САПР, древесно-кустарниковая растительность, ротор, шарнирно-сочлененные звенья, лезвия

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90029.

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Драпалюк, М. В. Имитационная модель ротора кустореза с шестью ножами / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Придворова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3 (43). – С. 121–129. – Библиогр.: с. 128–129 (13 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/10>.

Поступила: 06.07.2021 **Принята к публикации:** 26.09.2021 **Опубликована онлайн:** 01.10.2021

SIMULATION MODEL OF THE BRUSH CUTTER ROTOR WITH SIX BLADES

Mikhail V. Drapalyuk¹ ✉, md@vglta.vrn.ru,  0000-0002-8029-2706

Leonid D. Bukhtoyarov¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Anastasiia V. Pridvorova¹, anastasija.pridvorova@gmail.ru

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

Brush cutters are used in forestry for the care of forest plantations in operations for cutting unwanted tree and shrub vegetation (TSV). Rotors can be used as working bodies. The rotor we are considering is a flywheel, on the outer sides of which the blades are hinged. When cutting DKR with blades, a cutting moment arises, which is transmitted through the knife to the axis of its rotation and then to the shaft driving the flywheel. When designing a brush cutter structure, the impact from the cutting forces of the DKR is decisive for the choice of drive power and rotor parameters. We designed the brush cutter rotor in CAD Solidworks to study the cutting process of the DKR. Its geometric and mass parameters were set; the kinematic links of the links were established. The input motion characteristics were set in the Motion Solidworks module and the cutting moment was applied to the knives. Virtual sensors were installed on the model to record movement characteristics. As a result of a computer experiment for three options, which differ in cutting force and the presence of a damper, the trajectories of the knives and the power consumption of the drive were established.

Keywords: brush cutter, simulation, CAD, tree and shrub vegetation, rotor, articulated links, blades

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR according to the research project №20-38-90029. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Drapalyuk M. V., Bukhtoyarov L. D., Pridvorova A. V. (2021) Imitation model of the brush cutter rotor with six knives. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 3 (43), pp. 121-129 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.3/10>.

Received: 06.07.2021 **Accepted for publication:** 26.09.2021 **Published online:** 01.10.2021

Введение

При уходе за лесными культурами необходимо проводить срезание нежелательной древесно-кустарниковой растительности (ДКР), чтобы она не препятствовала их развитию. Существует большое число конструкций кусторезов, но, как правило, рабочим органом в них является один или несколько роторов, работающих в горизонтальном или вертикальном направлениях [1, 2]. Вопросами вращения тел относительно их центра масс посвящены работы В.Г. Вильке [3]. Вращение ротора с лезвиями изучено в работе Нуи Ма [4]. Кинематику вращения звеньев ротора в САПР Solidworks с помо-

щью компьютерного моделирования исследовал Chen Y [5]. Вопросы устойчивости ротора с лезвиями исследовал Saeed Bab [6]. Ю.Н. Абрамов исследовал ротор с шарнирными ножами для уборки ботвы [7]. В.Н. Коршун описал системой дифференциальных уравнений 2-го порядка механику роторов с шарнирным креплением ножей [8]. Ху Личао разработал 3D модель ротора кустореза с шарнирно-закрепленными лезвиями в Solidworks, провел прочностной и динамический анализ, получил распределение нагрузки от сил резания как на самих лезвиях, так и на роторе, относительно которого они закреплены [9]. Krzysztof Wójcik рассмот-

рел разные типы рабочих органов кусторезов с точки зрения создаваемой ими вибрации и вредного воздействия на оператора, проведенный им анализ позволил установить рекомендации по выбору рабочих органов и объемов двигателей, приводящих их во вращение [10]. Luxin Xie рассмотрел машину для уборки сахарного тростника, проанализировал влияние скорости вращения ротора, длины перекрытия режущих ножей и углы их наклона. Качественными показателями выступили процент неповрежденных стеблей и норматив отклонения длины измельчения, а также максимальная длина измельчения и потребляемая мощность. На основании регрессионных моделей была создана конечно-элементная модель как стебля сахарного тростника, так и лезвия, определены напряжения на лезвиях в процессе рубки [11].

В настоящее время разработка машин для удаления ДКР ведется в системах автоматизированного проектирования (САПР), поэтому целесообразно в этой же среде создать и имитационную модель, что сократит затраты на НИР и позволит инженеру-конструктору оперативно получить расчетные характеристики процесса работы его кустореза. Ранее нами были созданы имитационные модели обрезчика в Solidworks и ротора с гибкими рабочими органами в системе Unity [12, 13]. Проведенный анализ конструкций роторов и подходов в их исследовании показал возможность использования имитационного моделирования с помощью САПР и наметил вектор исследования.

Материалы и методы

За прототип нами был взят ротор, выпускаемый серийно (рис. 1). Используя САПР Solidworks, мы воспроизвели конструкцию ротора, изменили его геометрические и, как следствие, массовые характеристики, увеличив их, с целью повысить диаметр срезаемой растительности (рис. 2).

При разработке имитационной модели маховик был выполнен подвижным относительно оси O. Шесть лезвий шарнирно соединены с помощью осей A с маховиком. Для предотвращения свободного поворота ножей на 360° в конструкцию была добавлена виртуальная пружина и демпфер, расположенные, как показано на рис. 3.



Рисунок 1. Общий вид ротора, взятого за прототип
Figure 1. General view of the rotor, taken as a prototype
Источник: собственное фото авторов
Source: own photo of the authors

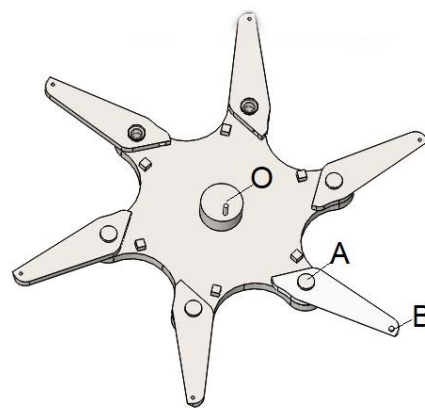


Рисунок 2. Общий вид 3D модели ротора
Figure 2. General view of the 3D model of the rotor
Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

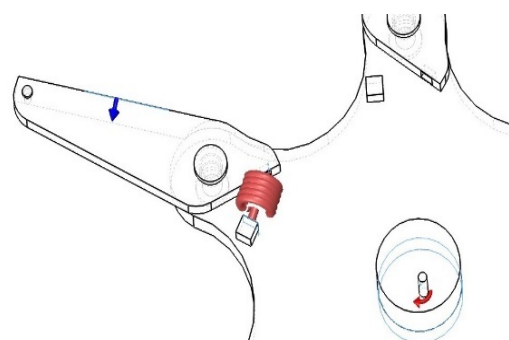


Рисунок 3. Силовые воздействия на ротор
Figure 3. Force effects on the rotor
Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

Нами было выполнено три компьютерных эксперимента. В первом и втором компьютерном

экспериментах момент от действия силы резания у кинематической пары лезвие-ротор был задан зависимостью, приведенной на рис. 4. При этом в первом случае присутствовала пружина, стабилизирующая вращение лезвия, а во втором она отсутствовала.

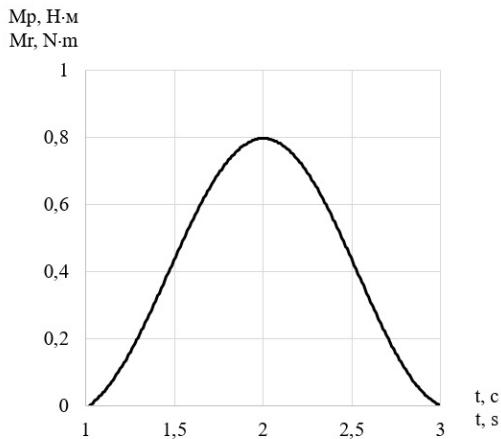


Рисунок 4. Воздействие момента сил резания от ДКР на лезвие (1 и 2 опыт)

Figure 4. Impact of the cutting force from the DKR on the blade (1 and 2 experience)

Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

При проведении третьего компьютерного эксперимента вращающий момент от сил резания был увеличен (рис. 5), стабилизирующая пружина присутствует.

Обозначим характерные точки ротора: О – шарнир крепления маховика к оси, А – шарнир крепления лезвия к оси маховика, В – расположение виртуального датчика на конце лезвия, рис. 6.

Аналогично установим датчики, которые отслеживают потребляемую мощность и угол поворота лезвия относительно его оси вращения.

Материал маховика и лезвий – сталь, рабочая зона 0,26 м. Основные геометрические и массовые характеристики спроектированных звеньев ротора приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Показания виртуальных датчиков, характеризующих затрачиваемую двигателем мощность и угол поворота ножа относительно его оси вращения для трех компьютерных экспериментов, приведены на рис. 7-12.

В результате проведения первого компьютерного эксперимента (рис. 7-8) установлено, что затраты мощности на разгон и работу ротора находятся в промежутке 0...400 Вт, с отдельными кратковременными пиками, превышающими указанные значения. В момент начала вращения лезвие не успевает повернуть за движением ротора (за счет инерции) и поэтому отклоняется на угол 10 градусов, далее при воздействии на лезвие силы резания и, как следствие, момента резания незначительной величины – 0,8 Н·м лезвие отклоняется на угол 70°.

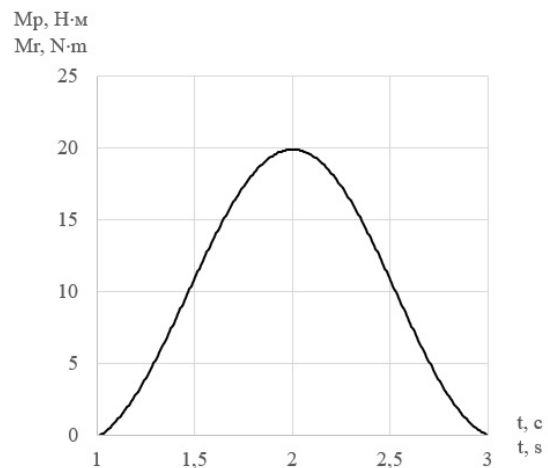


Рисунок 5. Воздействие момента силы резания от ДКР на лезвие (3 опыт)

Figure 5. Impact of the cutting force moment from the DCR on the blade (3 experience)

Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

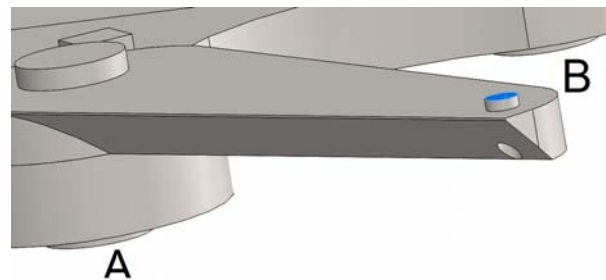


Рисунок 6. Место расположения датчика движения лезвия В относительно шарнира А

Figure 6. Location of the blade movement sensor B relative to the hinge A

Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

Кинематические и динамические параметры ротора, полученные с помощью САПР

Table 1

Kinematic and dynamic parameters of the rotor obtained using CAD

№	Параметр Parameter	Маховик Flywheel	Нож Blade
1	m, кг kg	0.72	0.045
2	L _{oa} , м m	0.07	
3	L _{ав} , м m		0.06
4	I _x , кг·м ² kg·m ²	[1, 0, 0]	[0.97, -0.21, 0.003]
5	I _y , кг·м ² kg·m ²	[0, 1, 0]	[0.21, 0.98, -0.03]
6	I _z , кг·м ² kg·m ²	[0, 0, 1]	[0.002, 0.26, 0.99]

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

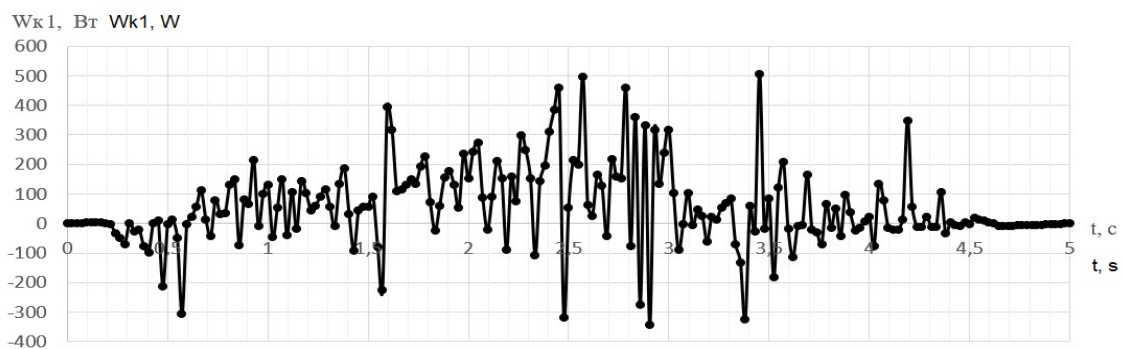


Рисунок 7. Показания виртуального датчика мощности, потребляемой двигателем ротора для первого компьютерного эксперимента

Figure 7. Readings of the virtual power sensor consumed by the rotor motor for the first computer experiment

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

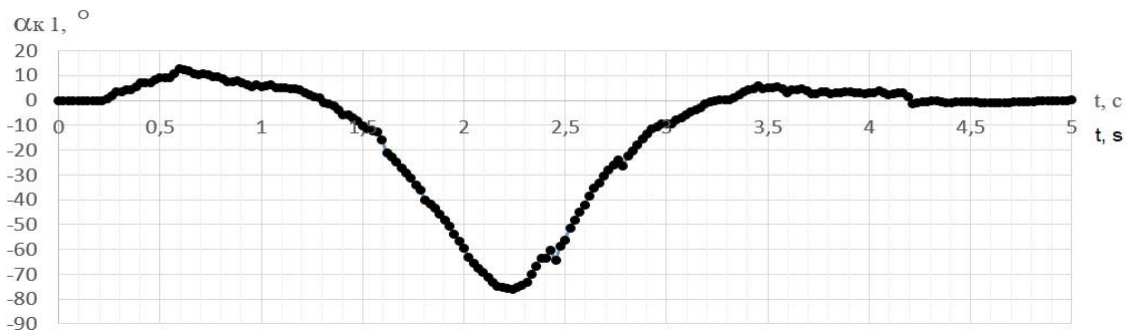


Рисунок 8. Показания виртуального датчика угла поворота лезвия относительно оси вращения для первого компьютерного эксперимента

Figure 8. Readings of the virtual sensor of the angle of rotation of the blade relative to the axis of rotation for the first computer experiment

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

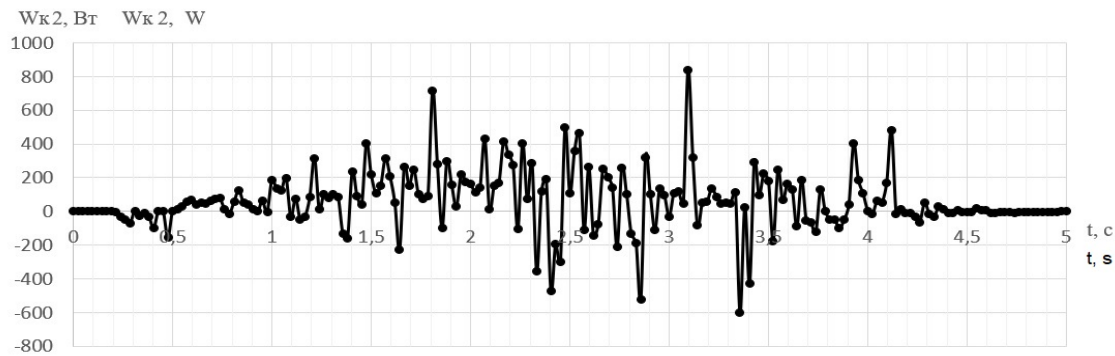


Рисунок 9. Показания виртуального датчика мощности, потребляемой двигателем ротора для второго компьютерного эксперимента

Figure 9. Readings of the virtual power sensor consumed by the rotor motor for the second computer experiment

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

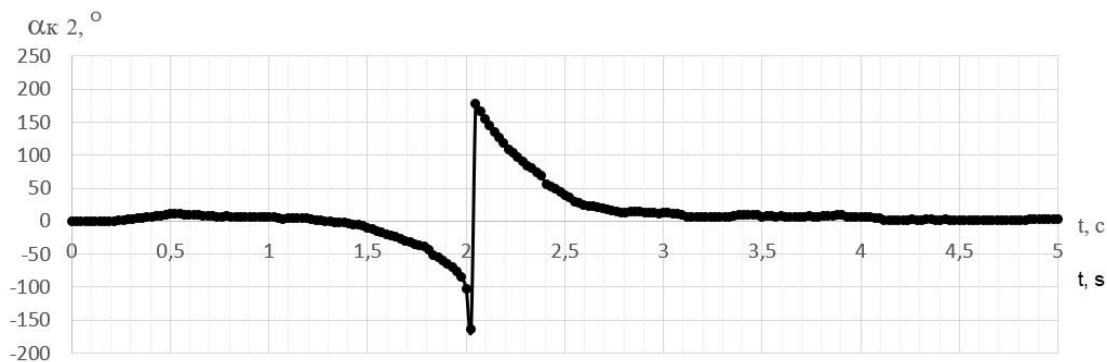


Рисунок 10. Показания виртуального датчика угла поворота ножа относительно оси вращения для второго компьютерного эксперимента

Figure 10. Readings of the virtual sensor of the knife rotation angle relative to the axis of rotation for the second computer experiment

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

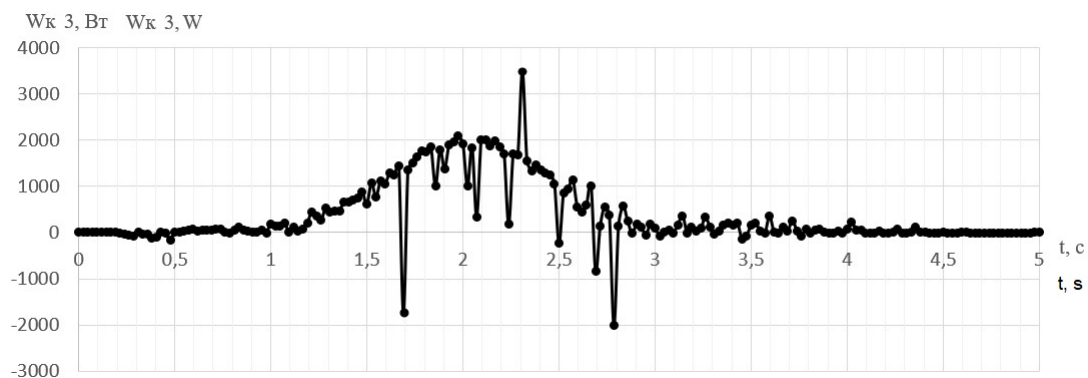


Рисунок 11. Показания виртуального датчика мощности, потребляемой двигателем ротора для третьего компьютерного эксперимента

Figure 11. Readings of the virtual sensor of the power consumed by the rotor motor for the third computer experiment

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

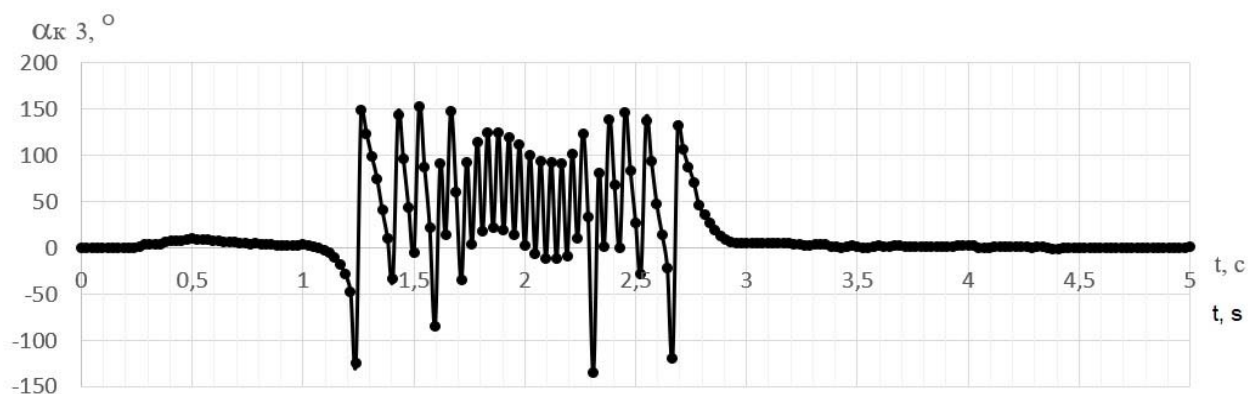


Рисунок 12. Показания виртуального датчика угла поворота ножа относительно оси вращения для третьего компьютерного эксперимента

Figure 12. Readings of the virtual sensor of the angle of rotation of the knife relative to the axis of rotation for the third computer experiment

Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

В результате проведения второго компьютерного эксперимента (рис. 9-10), в котором убрана пружина, препятствующая свободному вращению ножа, мы наблюдаем поворот ножа вокруг оси $+180...-180^\circ$. Мощность, затрачиваемая на работу ротора при этом, сохранилась в тех же пределах.

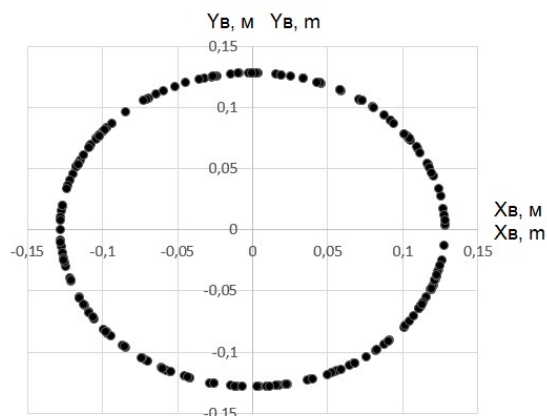


Рисунок 13. Траектория точки В лезвия в горизонтальной плоскости

Figure 13. Trajectory of point B of the blade in the horizontal plane

Источник: собственный результат авторов
Source: Authors' own result

В результате проведения третьего компьютерного эксперимента (рис. 11-12), в котором значительно увеличена сила резания и, как следствие, момент резания – 20 Н·м, мы видим возросшие значения затрат мощности на вращения до величины

2000 Вт. В результате значительного удара на ноже в течение 2 с происходят его колебания в пределах $0...120^\circ$ с отдельными пиковыми значениями, превышающими указанные.

Траектория вращения ножа на холостом ходу, полученная с виртуальных датчиков, фиксирующих координаты по ОХ и ОУ, показана на рис. 13.

Из рис. 13 следует, что датчик, отслеживающий вращение (см. рис. 6), на холостом ходу движется на постоянном радиусе и образует рабочую зону шириной 0,26 м.

Выводы

1. На основании полученной имитационной модели были установлены кинематические и мощностные характеристики работы ротора.

2. Для предложенной конструкции ротора определена рабочая зона резания – 0,26 м, и траектории движения ножа при воздействии на него сил резания в диапазоне от 0,8 до 20 Н·м.

3. Рассмотрено и показано положительное влияние пружины и демпфера на снижение колебаний ножа и предотвращение его вращения вокруг своей оси на 360° .

Список литературы

1. Ковалек Н. С., Ивашнев М. В. Состояние и тенденции развития оборудования для непрерывного срезания древесно-кустарниковой растительности. *Инженерный вестник Дона*. 2016;3(42): 29.
2. Шегельман И. Р., Ивашнев М. В., Будник П. В. Повышение эффективности удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении лесной машины. *Инженерный вестник Дона*. 2014; 3(30): 79.
3. Баранова Е. Ю., Вильке В. Г. Вращение упругого шара вокруг центра масс в гравитационном поле двух притягивающих центров. *Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика*. 2014;3:33-40.
4. Ma H., Lu Y., Wu Z. (et al.) A new dynamic model of rotor-blade systems. *J. of Sound and Vibration*, 2015; 357: 168. doi:10.1016/j.jsv.2015.07.036.
5. Chen Y., Huang M. F., Shi B. (et al.) Kinematic Analysis and Simulation of an A/C Axes Bi-Rotary Milling Head with Zero Transmission. *Advanced Materials Research*, 2012; 625: 146. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.625.146.
6. Bab S., Khadem S. E., Abbasi A., Shahgholi M. Dynamic stability and nonlinear vibration analysis of a rotor system with flexible/rigid blades. *Mechanism and Machine Theory* 2016;105: 633. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.07.026.
7. Угланов М. Б., Бачурин А. Н., Бышов Д. Н., Абрамов Ю. Н. Исследование модернизированного ботводробителя БД-4М с шарнирными ножами. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2017;128: 200-213. DOI 10.21515/1990-4665-128-012.
8. Коршун, В. Н. Механика роторных рабочих органов с переменными параметрами инерции. *Приоритетные направления развития науки в современном мире : Сборник статей по материалам I международной научно-практической конференции, Уфа, 13 мая 2019 года. Уфа: Вестник науки, 2019. С. 134-139.*
9. Luxin Xie, Jun Wang, Shaoming Cheng (et al.) Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. *Biosystems Engineering*, 2018;175: 16-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.004>.
10. Wójcik K. The influence of the cutting attachment on vibrations emitted by brush cutters and grass trimmers. *Forest Research Papers*. 2015;76. DOI:10.1515/frp-2015-0032.
11. Lichao X., Yong C., Rong Z. (et al.) Design and Simulation of Chopping Device of Straw Returning Machine. *IOP Publishing Ltd Phys.: Conf. Ser.* 2021;1748: 062066. DOI:10.1088/1742-6596/1748/6/062066.
12. Имитационная модель обрезчика ветвей в САПР / И. М. Баргенов, Л. Д. Бухтояров, В. П. Попиков, А. В. Придворова // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 1 (37). – С. 153–160. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20.
13. Bukhtoyarov L. D., Maksimenkov A. I., Lysych M. N., Abramov V. V. Movement simulation of flexible working body links i10n the Unity cross-platform development environment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 595: 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012014.

References

1. Kovalek N. S., Ivashnev M. V. Sostoyanie i tendencii razvitiya oborudovaniya dlya nepreryvnogo srezaniya drevesno-kustarnikovej rastitel'nosti. *Inzhenernyj vestnik Dona* 2016;3(42): 29 (in Russian).
2. Shegel'man I. R., ivashnev M. V., Budnik P. V. Povyshenie effektivnosti udaleniya drevesno-kustarnikovej rastitel'nosti pri nepreryvnom dvizhenii lesnoj mashiny. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2014; 3(30): 79 (in Russian).
3. Baranova E. Yu., Vilke V. G. Vrashchenie uprugogo shara vokrug centra mass v gravitacionnom pole dvuh prityagivayushchih centrov. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika*. 2014;3: 33-40 (in Russian).
4. Ma H., Lu Y., Wu Z. (et al.) A new dynamic model of rotor-blade systems. *J. of Sound and Vibration*, 2015; 357: 168. doi:10.1016/j.jsv.2015.07.036.
5. Chen Y., Huang M. F., Shi B. (et al.) Kinematic Analysis and Simulation of an A/C Axes Bi-Rotary Milling Head with Zero Transmission. *Advanced Materials Research*, 2012; 625: 146. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.625.146.

6. Bab S., Khadem S. E., Abbasi A., Shahgholi M. Dynamic stability and nonlinear vibration analysis of a rotor system with flexible/rigid blades. *Mechanism and Machine Theory* 2016;105: 633. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.07.026.
7. Uglanov M. B., Bachurin A. N., Byshov D. N., Abramov Yu. N. Issledovanie modernizirovannogo botvodrobitelya BD-4M s sharnirnymi nozhami. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017; 128: 200-213. DOI 10.21515/1990-4665-128-012 (in Russian).
8. Korshun V. N. Mekhanika rotornyh rabochih organov s peremennymi parametrami inercii. *Sbornik statej po materialam I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Ufa, 13 maya 2019 goda*. Ufa, 2019. S. 134-139 (in Russian).
9. Luxin Xie, Jun Wang, Shaoming Cheng (et al.) Optimisation and finite element simulation of the chopping process for chopper sugarcane harvesting. *Biosystems Engineering*, 2018;175: 16-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.004>.
10. Wójcik K. The influence of the cutting attachment on vibrations emitted by brush cutters and grass trimmers. *Forest Research Papers*. 2015;76. DOI:10.1515/frp-2015-0032.
11. Lichao X., Yong C., Rong Z. (et al.) Design and Simulation of Chopping Device of Straw Returning Machine. *IOP Publishing Ltd Phys.: Conf. Ser.* 2021;1748: 062066. DOI:10.1088/1742-6596/1748/6/062066.
12. Bartenev I. M., Bukhtoyarov L. D., Popikov V. P., Pridvorova A. V. (2020) Imitacionnaya model' obrezhchika vetvej v SAPR. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. Vol. 10, No. 1 (37), pp. 153-160. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20 (in Russian).
13. Bukhtoyarov L. D., Maksimenkov A. I., Lysych M. N., Abramov V.V. Movement simulation of flexible working body links in the Unity cross-platform development environment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020; 595: 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012014.

Сведения об авторах

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: md@vglta.vrn.ru.

✉ *Бухтояров Леонид Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Придворова Анастасия Викторовна – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: anastasija.pridvorova@gmail.ru.

Information about the authors

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: md@vglta.vrn.ru.

✉ *Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich* – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Pridvorova Anastasiia Viktorovna – Postgraduate Student of the Department of forestry mechanization and machine design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8029-2706>, e-mail: anastasija.pridvorova@gmail.ru.

✉- Для контактов/Corresponding author