

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РОТОРА КУСТОРЕЗА С ШАРНИРНО УСТАНОВЛЕННЫМИ ЛЕЗВИЯМИ

Л.Д. Бухтояров

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ),
Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

vglta-mlx@yandex.ru

Определена необходимость проведения рубок ухода, приведены современные методы и оборудование для их осуществления. Для повышения продуктивности лесных культур рекомендуется проводить их осветление. Установлено, что наиболее производительным является механизированный способ работ, при котором технологическое оборудование — кусторез, располагается на базе колесных или гусеничных машин. Определено, что при разработке нового оборудования для срезания кустарника необходимо проводить обоснование его параметров. Проанализированы методы разработки новых лесных машин и выявлена необходимость использования автоматизированных средств проектирования, и составления имитационных моделей в современных программных комплексах, которые тесно связаны с конструкторскими программами. В программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ) создана имитационная модель работы ротора кустореза. Модель рекомендуется к использованию, при обосновании параметров роторов с шарнирно-сочлененными рабочими органами. Модели звеньев являются параметрическими, что позволяет настроить имитационную модель на разные геометрические размеры без потери связей в шарнирах. В имитационной модели использовано 3D-контактное взаимодействие УМ для ротора и цепи. Изучены фазы разгона, холостого хода и торможения ротора с шарнирно-сочлененным, цепным рабочим органом. Проведен лабораторный эксперимент с ротором кустореза, который подтвердил полученные посредством имитационного моделирования траектории движения цепи. Аналитически рассчитана скорость лезвия на холостом ходу, что подтвердило полученные на имитационной модели результаты. Получены траектории движения звеньев, их скорости и затраты крутящего момента на приводном валу электродвигателя.

Ключевые слова: ротор кустореза, имитационное моделирование, универсальный механизм, УМ

Ссылка для цитирования: Бухтояров Л.Д. Имитационное моделирование работы ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 38–49. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-38-49

Лесное хозяйство является одной из ключевых отраслей, обеспечивающих успешное развитие экономики. Повышение продуктивности лесных культур за счет рубок ухода — одна из важнейших задач, которую следует решить лесопользователям. Первоочередное значение при этом приобретает степень механизации [1, 2].

К перспективным направлениям ухода за лесными культурами относится использование колесных и гусеничных машин тягового класса до 14 кН, снабженных технологическим оборудованием с активным приводом — кусторезом. Кусторез предназначен для срезания древесной кустарниковой растительности, затеняющей основные культуры, что снижает их продуктивность. Результативность проведения осветлений в значительной мере зависит от правильного выбора и рационального использования технологического оборудования. Следует воз-

держиваться от применения энергонасыщенной техники при работах по расчистке, привлекая простые средства механизации, обеспечивающие хорошее качество осветления и находить баланс между производительностью машин и понесенными затратами [3–10].

Технологические операции по удалению древесно-кустарниковой растительности распространены как в лесном, так и в сельском хозяйстве [11–19]:

- при проведении лесовосстановительных работ для устранения затенения основных культур порослью второстепенных пород;
- расчистки лесных массивов в целях безопасной эксплуатации линий электропередачи и других сетей;
- расчистки кустарников на заросших сельскохозяйственных полях, вдоль мелиоративных каналов в целях обеспечения благоприятных условий функционирования агропромышленного комплекса;
- обрезки ветвей в питомниках и садах.

Выбор способа механизированного удаления древесно-кустарниковой растительности определяет характер и последовательность операций, объем энергозатрат, уровень производительности труда, финансовые издержки и др. Рабочий орган необходимо доставить к предмету труда — ветвям. Для этого используют энергетическую базу (трактор), на которую навешивают раму машины. От энергетической базы к рабочему органу вращение передается механическим (от вала отбора мощности) или гидравлическим (от насосной станции) путем. Рабочий орган может располагаться на неподвижной относительно трактора раме (имеющей возможность только переводиться в транспортное и рабочее положение) и на манипуляторе (имеющей возможность наведения к месту резания). Таким образом, для комплексного подхода разработки новых и модернизации существующих машин, предназначенных для конкретных производственных условий, необходимо выполнить комплекс научных изысканий, в том числе исследования, посвященные ротору кустореза.

Для сопоставления теоретических и лабораторных результатов исследования процесса резания ветвей целесообразно использовать лабораторные установки с цифровой фиксацией параметров [20].

Процесс резания ветвей происходит при высоких скоростях, поэтому для его описания может быть использована теория удара. Параметры роторных машин с шарнирно-закрепленными ножами описывают с помощью дифференциальных уравнений [21–25]. Однако данный подход предназначен для случая, когда система представляет собой двухзвенный математический маятник. При гибком рабочем органе, с тремя звеньями и более, количество степеней свободы значительно увеличивается, поэтому такой ротор представляет собой систему твердых тел, которая обладает большим числом степеней свободы. Решение подобных задач аналитическим способом достаточно затруднительно, по этой причине целесообразно использование численных методов [26–29].

Существует несколько программных комплексов, которые в своей основе используют математический аппарат для описания взаимодействия твердых тел и позволяют разрабатывать имитационные модели технических объектов. Среди них распространены Matlab Simulink и «Универсальный механизм» (ПК УМ 9.1) [30–34]. В связи с современными требованиями к переходу на отечественное программное обеспечение,

в настоящей работе используется программный комплекс «Универсальный механизм 9.1». Он позволяет разрабатывать комплексную имитационную модель, которая включает в себя следующие элементы:

- 3D-модель звеньев механизма, выполненную с помощью средств автоматизированного проектирования, а значит обладающую требуемыми геометрическими и массовыми характеристиками;
- кинематические соединения звеньев с учетом сил трения;
- механические передачи;
- контактное взаимодействие твердых тел.

Все входные параметры имитационной модели задаются в свойствах каждого элемента в соответствии с математическим аппаратом, заложенным в программном комплексе «Универсальный механизм 9.1».

При неподвижном роторе кустореза гибкие рабочие органы под действием силы тяжести свисают вниз, во время разгона занимают радиальное направление, а при торможении возвращаются в исходное положение. На движение ротора с шарнирно закрепленными звеньями влияют их кинематические динамические параметры. Так, если длина рабочего органа будет значительна, то возможен захлест звеньев, удар их друг о друга, что приведет их к быстрому выходу из строя. При недостаточной скорости вращения цепь может не выйти в радиальное положение и будет обладать недостаточной кинетической энергией, что снизит ее способность к резанию. Важным параметром служит масса звеньев, напрямую влияющая на кинетическую энергию и накопленную силу инерции. Рассмотрим процесс работы роторного кустореза с шарнирно установленными лезвиями [35].

Цель работы

Цель работы — определение кинематических и динамических характеристик ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями путем имитационного моделирования.

Материалы и методы

Ротор кустореза представляет собой систему твердых тел, приводимых во вращение механически с помощью двигателя. В качестве двигателя может быть использован механический привод от вала отбора мощности трактора, гидравлический или электрический мотор.

В разработанной нами лабораторной установке был использован электрический привод в связи с удобством снятия показаний и простоты подключение к электрической сети. Характеристики используемого привода следующие:

- мощность $P_{дв} = 0,75$ кВт;
- номинальный крутящий момент $M_{ном} = 2,54$ Н·м;
- пусковой момент $M_{пуск} = 6,6$ Н·м;
- максимальная частота вращения $n_{max} = 3200$ об./мин;
- момент инерции двигателя $J_{дв} = 0,00637$ кг·м².

Для регулирования оборотов применяли регулятор напряжения GSMIN AK76 50-230В. Пересчет напряжения в обороты проводили по формуле

$$n_{рот} = \frac{U_{рег} n_{max}}{U_{сет}}, \quad (1)$$

где $n_{рот}$ — обороты на роторе двигателя, об./мин;

$U_{рег}$ — напряжение, подаваемое на двигатель регулятором напряжения, В;

$U_{сет}$ — напряжение сети, на которое рассчитан двигатель, $U_{сет} = 230$ В.

Для моделирования работы ротора кустореза рассмотрим пять его фаз: I — покой; II — разгон; III — установившееся движение; IV — торможение; V — покой.

Угловую скорость в момент разгона определяем по формуле

$$\omega_{рот} = \frac{M_{ном}}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{J_{дв}} t} \right), \quad (2)$$

где t — время, с;

k — крутизна характеристики двигателя,

$$k = M_{ном} / \omega_{уст}$$

Проведем разгон ротора до частоты вращения $n_{уст} = 1000$ об./мин. В этом случае его угловая скорость будет равна

$$\omega_{уст} = 2\pi n_{уст} / 60 = 104,6 \text{ рад/с.}$$

Разгон до выбранной частоты проводим с помощью регулятора напряжения, установив $U_{рег} = 72$ В.

Таким образом, входная характеристика работы ротора примет вид, представленный на рис. 1.

Введем следующие допущения.

1. Корпус, соединенный с рамой, имеет только поступательные степени свободы относительно почвы по трем осям OX , OY , OZ .

2. Лезвия представим в виде полиэдров со сферами на концах. Каждое звено имеет одно

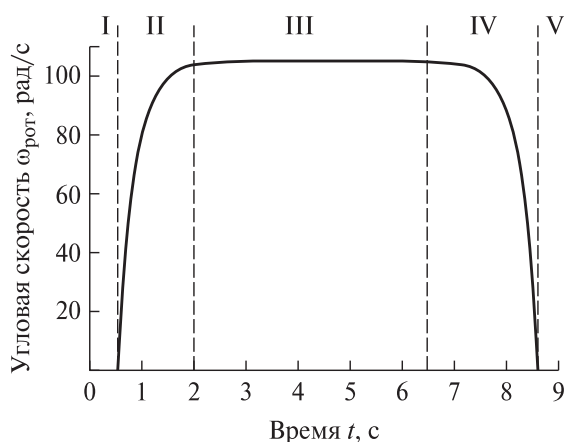


Рис. 1. Угловая скорость ротора в пяти фазах
Fig. 1. Angular speed of the rotor in five phases

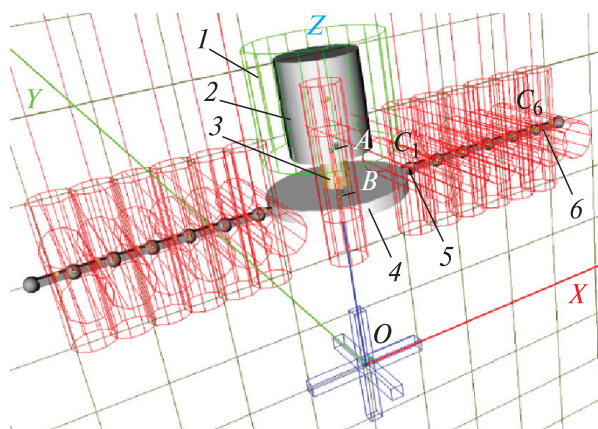


Рис. 2. Компоночно-кинематическая схема ротора кустореза: 1 — корпус двигателя; 2 — ротор двигателя; 3 — фланец; 4 — ротор кустореза; 5 — проушины; 6 — лезвия

Fig. 2. Layout and kinematic diagram of the brush cutter rotor: 1 — engine housing; 2 — engine rotor; 3 — flange; 4 — brush cutter rotor; 5 — lugs; 6 — blades

относительно другого две вращательные степени свободы вокруг собственных осей OZ , OX с моментом трения $M_{тр.лез.} = 0,0004$ Н·м. 3D-контакт включен между ротором и звеньями цепи.

3. Если для получения требуемой массы звеньев недостаточно изменения геометрических размеров (в случае упрощения формы звеньев) то корректируем плотность материала до необходимых значений.

4. Ротор двигателя 2 (см. рис. 2), имеет одну вращательную степень свободы относительно рамы 1 с моментом трения, равным номинальному крутящему моменту $M_{тр.дв.} = M_{ном}$.

5. Численный метод интегрирования Park. Параметры 3D-контакта по умолчанию ПК UM 9.1.

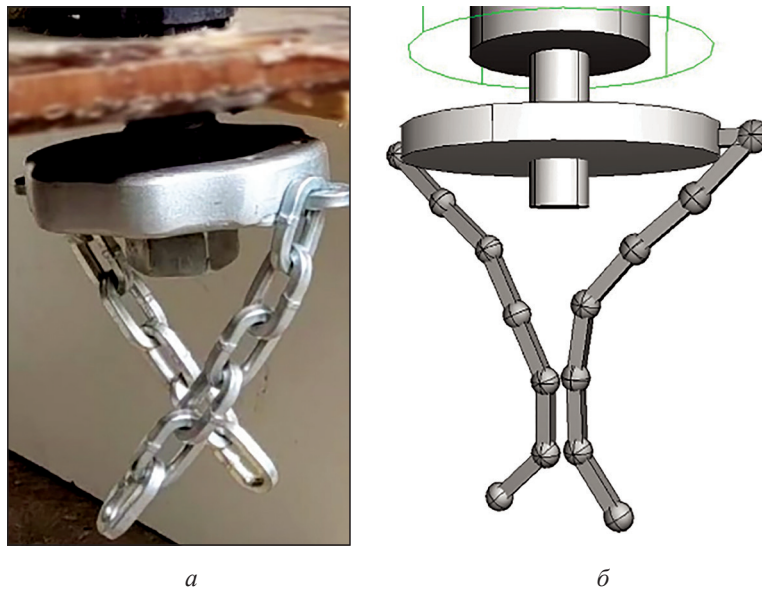


Рис. 3. Удар цепей друг о друга: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,28 с

Fig. 3. Hitting of chains against each other: *a* — prototype of the rotor; *б* — the result of simulation for a model time of 0,28 s

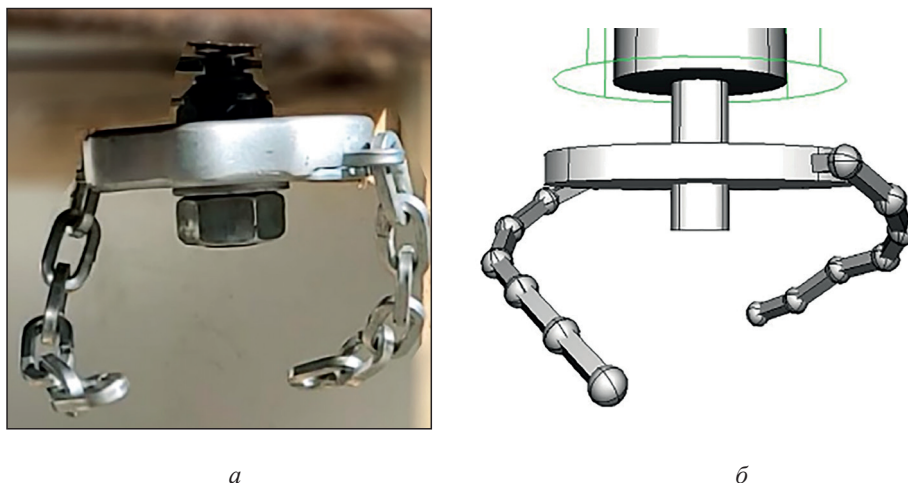


Рис. 4. Начало разгона ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,63 с

Fig. 4. Start of rotor acceleration: *a* — rotor prototype; *б* — the result of simulation for a model time of 0,63 s

Для моделирования ротора кустореза используем ПК «Универсальный механизм». Компонентно-кинематическая схема ротора представлена на рис. 2. (размер ячеек сетки 0,05 м).

Представим корпус двигателя, жестко соединенный с рамой, как фигуру в виде цилиндра l радиусом 0,05 м, высотой 0,08 м (см. рис. 2). Поднимем корпус l относительно начала координат точки O на высоту резания и укажем три поступательные степени свободы, движение по

которым зададим как постоянную функцию от времени $x = V_x t$; аналогично и для осей OY , OZ . Представим ротор двигателя фигурой в виде цилиндра 2 радиусом 0,03 м и высотой 0,07 м. Зададим ему одну вращательную степень свободы относительно корпуса l , и добавим момент трения, соответствующий номинальному крутящему моменту $M_{тр.дв.} = M_{ном.}$ Таким образом, если момент сопротивления вращению будет больше момента трения $M_{тр.дв.}$, то передача



Рис. 5. Разгон ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,76 с
Fig. 5. Rotor acceleration: *a* — rotor prototype; *б* — the result of simulation for a model time of 0,76 s



Рис. 6. Холостой ход ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 6 с
Fig. 6. Rotor idling: *a* — rotor prototype; *b* — the result of simulation for a model time of 6 s

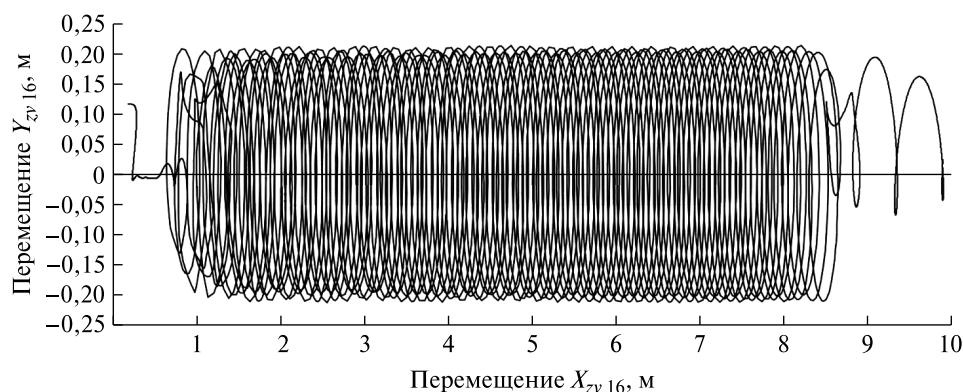


Рис. 7. Вид сверху, траектория движения шестого (крайнего) звена цепи в плоскости XOY
Fig. 7. Top view, the trajectory of the sixth (ending) chain link in the XOY plane

вращения от корпуса на двигатель прекратится. Соединим неподвижно двигатель 2 и фланец 3. Фланец 3 передает вращение от двигателя ротору кустореза 4, ротор представлен фигурой в виде цилиндра $R_{\text{рот}} = 0,0525$ м.

Используем поступательную кинематическую пару, у которой по оси OZ сместим систему координат ротора кустореза относительно фланца на 0,015 м, а шарнирную координату (угол) зададим с помощью зависимости угловой скорости от времени (см. рис. 1). Звенья цепи представим

в виде параллелепипеда длиной $L_{\text{зв}} = 0,025$ м, и сторонами равными $R_{\text{сфер}} = 0,005$ м. На концах звеньев расположим сферы радиусом $R_{\text{сфер}}$. На оси OX с обеих сторон ротора кустореза 4 жестко установим проушины крепления 5 (представленные в виде параллелепипеда и одной сферы). Соединим «обобщенным» шарниром C_1 сферу крепления и сферу первого звена лезвия, используем постоянный сдвиг по оси OX на величину длины крепления и зададим две вращательные степени свободы относительно

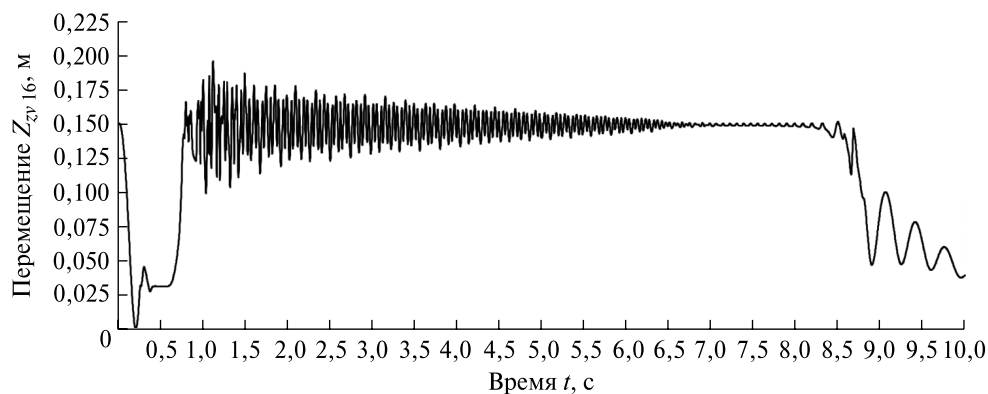


Рис. 8. Вид сбоку, траектория движения шестого (крайнего) звена цепи в плоскости XOZ
Fig. 8. Side view, trajectory of the sixth (ending) chain link in the XOZ plane

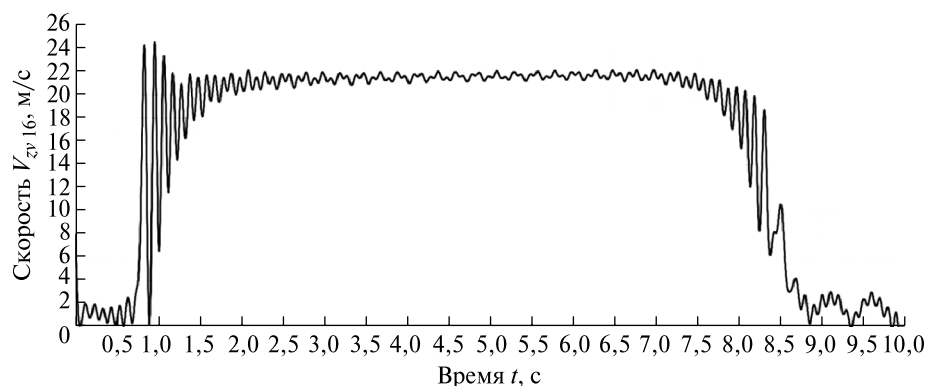


Рис. 9. Изменение линейной скорости шестого лезвия в процессе имитационного эксперимента
Fig. 9. Change in the linear speed of the sixth blade during the simulation experiment

осей OZ и OY . Так как в реальном прототипе между звеньями действуют силы трения, то зададим момент трения $M_{тр.лз.} = 0,0004 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Аналогично соединяются последующие лезвия (шарниры $C_1 \dots C_6$). Те же действия совершаются с цепью, расположенной симметрично с другой стороны ротора.

Для оценки результатов имитационного моделирования сравним их с полученными данными на лабораторном стенде. Для снятия видео работы стенда был использован режим замедленной съемки камерой Galaxy S20, обеспечивающий скорость съемки 960 кадров/с. Из снятого видео были отобраны отдельные кадры, соответствующие режимам работы ротора кустореза.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим режимы работы ротора кустореза и положение рабочего органа. В момент

начала разгона или при его окончании цепи могут касаться одна другой (рис. 3).

В момент начала разгона происходит резкое ускорение ротора, и звенья цепи за счет своей инерции и вращения одной относительно другой приобретают положение, представленное на рис. 4.

При разгоне звенья начинают занимать горизонтальное положение (рис. 5).

После разгона наступает фаза холостого хода и звенья под действием силы инерции занимают положение, близкое к горизонтальному, при этом они перемещаются по оси OZ в пределах нескольких сантиметров (рис. 6–8).

Примем, что поступательная скорость рамы равна $0,5 \text{ м/с}$, тогда за 10 с рама пройдет 10 м . Скорость входящей в поступательную кинематическую пару рама — начало системы координат (почва), поэтому, как только мы укажем значение и запустим процесс на моделирования, рама начнет двигаться поступательно по оси OX .

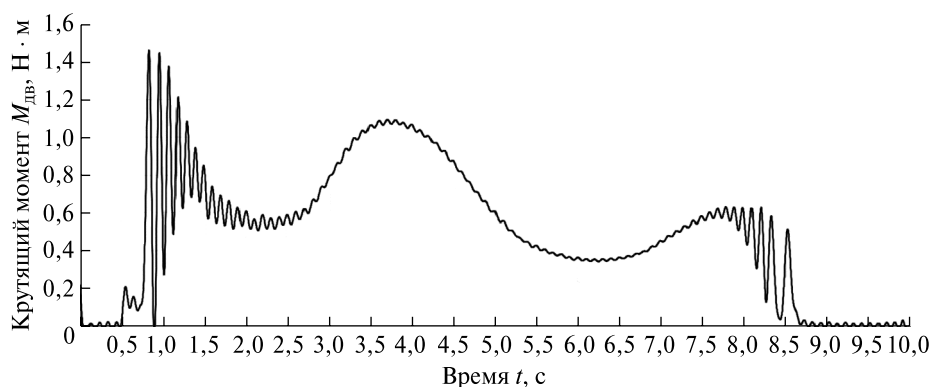


Рис. 10. Крутящий момент, который преодолевает электродвигатель для вращения ротора

Fig. 10. The torque that an electric motor overcomes to rotate the rotor

На основании имитационного эксперимента построим траекторию движения крайнего шестого звена. Для этого сохраним полученные в результате моделирования значения X , Y шестого лезвия и отложим на оси абсцисс координату по X , а по оси ординат — координату по Y (см. рис. 6).

Таким образом, видно, что в течение первых 1,5 с происходит разгон, а дальше движение можно считать установившимся, траектория на виде сверху имеет форму циклоиды.

После 8 с угловая скорость снижается (см. рис. 1) и цепи опускаются вниз. Биение цепи, опускание и поднятие наглядно показано на виде сбоку (см. рис. 8).

Для шестого звена цепи найдем, по результатам имитационного эксперимента, скорость в процессе моделирования (рис. 9).

При известной угловой скорости $\omega_{\text{рот}}$ и расстоянии от оси вращения ротора до оси шестого звена лезвия R_6 , можно найти его линейную скорость по аналитической зависимости $V_{6\text{зв}} = \omega_{\text{рот}} R_6$. Из рис. 1 мы знаем угловую скорость на холостом ходу, а из рис. 2 на основании сетки или по параметрам ротора найдем R_6 . По аналитической формуле получим $V_{6\text{зв}} = 104,6 \cdot 0,202 = 21,18$ м/с, а по результатам эксперимента, для холостого хода (см. рис. 9) $V_{6\text{зв}} = 21$ м/с.

Найдем по результатам имитационного эксперимента, момент, который создают на валу двигателя силы сопротивления (рис. 10). Видно, что для изученного режима достаточно номинального крутящего момента выбранного двигателя.

Выводы

1. Разработана имитационная модель в ПК UM 9.1 для моделирования работы ротора с шарнирно установленными лезвиями, отличающаяся

учетом фаз разгона, холостого хода и торможения, а также параметризацией параметров звеньев.

2. Имитационная модель ротора и цепи является параметрической, поэтому может быть оперативно перенастроена на другие размеры, массы, и скорости для моделирования роторов. Разработанная имитационная модель позволяет обосновать конструкции роторов кусторезов, на основании их трехмерных моделей из систем автоматизированного проектирования, что снижает трудоемкость разработки новых кусторезов.

3. Сравнение положения звеньев на фазах работы ротора, полученных путем моделирования и лабораторного эксперимента, показало высокую адекватность модели. Получены числовые значения координат звеньев, их скоростей и момента на валу двигателя на всем процессе моделирования. Их проверка по аналитическим формулам также показала высокую сходимость. Таким образом, цель работы по определению кинематических и динамических характеристик ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями достигнута и модель рекомендуется к использованию.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Список литературы

- [1] Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 429, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.027

- [2] Kuuluvainen T., Tahvonon O., Aakala T. Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: a review // *AMBIO*, 2012, no. 41(7), pp. 720–737. DOI:10.1007/s13280-012-0289-y
- [3] Бартнев И.М., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей. М.: Флинта, Наука, 2007. 208 с.
- [4] Платонов А.А. Платонова М.А. Результаты статистической обработки данных параметров оборудования для очистки линейных инфраструктур // *Современные проблемы математики в прикладных науках: Материалы Всерос. открытой конференции, Воронеж, 15 марта 2022 года*. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2022. С. 58–65. DOI: 10.58168/MPMAS2022_58-65
- [5] Platonova M.A., Platonov A.A., Shchablykin P.N. Practical implementation of the methodology for assessing the density of unwanted growth in the overgrowing of infrastructure facilities // *J. of Agriculture and Environment*, 2022, no. 7(27). DOI: 10.23649/jae.2022.27.7.007
- [6] Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 6. С. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150
- [7] Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Расчет рабочей скорости подачи активного навесного кустореза в зависимости от параметров срезаемого кустарника // *Современные проблемы науки и образования*, 2013. № 5. С. 133–135.
- [8] Glushkov S., Popikov P.I., Malyukov S.V., Chakarov V., Boyadzhiev, D. Study of the work of a self-propelled mulcher in the preparation of forest soils for planting poplar in the conditions of Bulgaria // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, p. 12006. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012006
- [9] Mohite D., Agrawal K., Kumar K., Deb A. Technical Aspects of Multipurpose Weed Cutter or Power Weeder // *IJERSTE*, 2021, v. 10, no 7, p. 33765. DOI: 10.13140/RG.2.2. 11613.33765
- [10] Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., Куницкая О.А., Прокудина А.В., Григорьева О.И., Отмахов Д.В. Изучение мощностных показателей и качества среза шарнирно-сочлененным и ножевым рабочими органами роторного кустореза // *Системы. Методы. Технологии*, 2023. № 2(58). С. 7–13. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-7-13
- [11] Абдразаков Ф.К. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств в мелиоративном производстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01. Саратов, 2002. 572 с.
- [12] Абдразаков Ф.К., Хальметов А.А. Совершенствование организации и технологии удаления древесно-кустарниковой растительности на оросительных системах с помощью универсального кустореза. Саратов: Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2013. 124 с.
- [13] Даденко Е.В. Анализ и синтез оптимального процесса срезания кустарника цилиндрической фрезой кустореза-измельчителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Ростов-на-Дону, 1983. 21 с.
- [14] Земляной А.А. Разработка и исследование ленточного режущего аппарата машины для контурной обрезки плодовых деревьев: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Мичуринск, 2022. 22 с.
- [15] Куракин В.Н. Обоснование параметров рабочего органа для срезания кустарника: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Л., 1990. С. 174.
- [16] Лушников М.В. Совершенствование технологического процесса и обоснование основных параметров ротационно-консольного кустореза для осветления лесных культур на нераскорчеванных вырубках: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Саратов, 2001. 197 с.
- [17] Мазуркин П.М. Обоснование параметров модульных рабочих органов лесозаготовительных машин на начальных стадиях проектирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Йошкар-Ола, 1995. 403 с.
- [18] Попиков В.П. Обоснование параметров технологического оборудования машины для формирования крон деревьев лесосеменных плантаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2009. 16 с.
- [19] Завражнов А.А., Ланцев В.Ю., Егоров Д.А., Земляной А.А. Использование электропривода в машинах для 3D контурной обрезки плодовых деревьев // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*, 2012. № 3. С. 220–225.
- [20] Суханов Ю.В., Царев Т.А., Васильев А.С., Ивашнев М.В. Стенд для исследований характеристик процесса резания // *Инженерный вестник Дона*, 2021. № 5(77). С. 121–127.
- [21] Ивашнев М.В. Математический анализ колебательного процесса шарнирно-закрепленного ножа роторного кустореза // *Вузовская наука — региону: Материалы IV Всерос. конф., 21 февраля 2006 г. Вологда: Изд-во ВоГТУ, 2006. Т. 1. С. 41–43.*
- [22] Ивашнев М.В. Математическое описание процесса работы роторного кустореза // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2007. № 181. С. 94–99.
- [23] Ивашнев М.В., Шегельман И.Р., Колесников Г.Н. К вопросу совершенствования узлов роторных кусторезов // *Перспективы науки*, 2014. № 7(58). С. 80–82.
- [24] Ивашнев М.В. Теоретические аспекты создания роторных машин с непрерывным срезанием древесно-кустарниковой растительности // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. Т. 2, № 5–3(10–3). С. 127–130. DOI: 10.12737/6942
- [25] Ivashnev M.V., Kalinin R.K., Sukhanov Yu.V., Vasilyev A.S. Protection of Linear Facilities Passing through Forest Territories // *Components of Scientific and Technological Progress*, 2022, no. 9(75), pp. 9–11.
- [26] Драпалюк М.В., Полев В.С. Моделирование рубящих элементов цепного кустореза // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2010. № 6. С. 94–98.
- [27] Бартнев И.М., Малоков С.В. Имитационное моделирование работы кустореза // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. Т. 2. № 5–1. С. 192–194.
- [28] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е. Современное программное обеспечение для проведения исследований по нагрузкам, устойчивости и проходимости машин // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015. Т. 3. № 5–1(16–1). С. 209–214. DOI: 10.12737/14490
- [29] Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Компьютерное моделирование активной подвески транспортного средства с помощью программы SimInTech // *Теория и практика инновационных технологий в АПК:*

- Матер. нац. науч. конф., Воронеж, 19–21 апреля. Ч. I. Воронеж: Изд-во ВГАУ им. Императора Петра I, 2022. С. 24–37.
- [30] Барте́нев И.М., Малоуков С.В. Результаты моделирования работы кустореза, оснащенного упорными-улавливателями порослевин // Тракторы и сельхозмашины, 2014. № 3. С. 9–12.
- [31] Bukhtoyarov L.D., Kunickaya O.I., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters // J. of Applied Engineering Science, 2022, v. 20, pp. 1–10. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>
- [32] Попиков П.И., Бухтояров Л.Д., Платонов А.А., Вакула Е.Ю. Имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях // Resources and Technology, 2020. Т. 17. № 4. С. 1–14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402
- [33] Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 875, p. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>
- [34] 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, v. 595, p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012014>
- [35] Барте́нев И.М., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Ротор кустореза. Патент 2238637С1 РФ, МПК А 01 G 23/06, заявитель и патентообладатель ВГЛТА, № 2003103223/12, заявл. 03.02.2003, опубл. 27.10.2004.

Сведения об авторе

Бухтояров Леонид Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), vglta-mlx@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2024.

Одобрено после рецензирования 03.10.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

OPERATION SIMULATION MODELING OF ROTOR BRUSH CUTTER WITH HINGED BLADES

L.D. Bukhtoyarov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

vglta-mlx@yandex.ru

The necessity of forest thinning has been determined, and modern methods and equipment for their implementation have been identified. In order to increase the forest crops productivity, it is recommended to thin them. It has been established that the most productive is a mechanized method, in which the technological equipment such as a brush cutter, is located on the basis of wheeled or tracked machines. It has been determined that when developing new equipment for cutting shrubs, it is necessary to justify its parameters. The methods of developing new forest machines have been analyzed and the need for using automated design tools and compiling simulation models in modern software packages that are closely related to design programs has been identified. A simulation model of the brush cutter rotor operation has been created in the Universal Mechanism (UM) software package. The model is recommended for use when justifying the parameters of rotors with articulated working bodies. The links of the brush cutter working body in the simulation model are presented in a simplified form, the blade consists of a parallelepiped and two spheres at the edges, the rotor of the electric motor, the flange and the rotor of the brush cutter working body are in the form of a cylinder. The link models are parametric, which allows the simulation model to be adjusted to different geometric dimensions without losing the connections in the hinges. The simulation model uses 3D-contact interaction UM for the rotor and the chain. The acceleration, idle and braking phases of the rotor with an articulated, chain working element are studied. A laboratory experiment with a brush cutter rotor was conducted, which confirmed the chain motion trajectories obtained by means of simulation modeling. The blade speed at idle was calculated analytically, which confirmed the results obtained on the simulation model. The motion trajectories of the links, their speeds and torque costs on the drive shaft of the electric motor were obtained.

Keywords: brush cutter rotor, simulation, universal mechanism, UM

Suggested citation: Bukhtoyarov L.D. *Imitacionnoe modelirovanie raboty rotora kustoreza s sharnirno ustanovlennymi lezviyami* [Operation simulation modeling of rotor brush cutter with hinged blades]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 38–49. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-38-49

References

- [1] Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 429, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.027
- [2] Kuuluvainen T., Tahvonon O., Aakala T. Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: a review. *AMBIO*, 2012, no. 41(7), pp. 720–737. DOI:10.1007/s13280-012-0289-y
- [3] Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Konstruktivnyye i parametry mashin dlya raschistki lesnykh ploshchadey* [Designs and parameters of machines for clearing forest areas]. Moscow: Flinta, Nauka, 2007, 208 p.
- [4] Platonov A.A., Platonova M.A. *Rezultaty statisticheskoy obrabotki dannykh parametrov oborudovaniya dlya ochistki lineynykh infrastruktur* [Results of statistical processing of data on parameters of equipment for cleaning linear infrastructures]. *Sovremennye problemy matematiki v prikladnykh naukakh: materialy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii* [Modern problems of mathematics in applied sciences: Materials of the All-Russian open conference], Voronezh, March 15, 2022. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2022, pp. 58–65. DOI: 10.58168/MPMAS2022_58-65
- [5] Platonova M.A., Platonov A.A., Shcheblykin P.N. Practical implementation of the methodology for assessing the density of unwanted growth in the overgrowing of infrastructure facilities. *J. of Agriculture and Environment*, 2022, no. 7(27). DOI: 10.23649/jae.2022.27.7.007
- [6] Platonov A.A. *Grabli lesnye: naznacheniye, oblast' primeneniya, klassifikatsiya* [Forest rake: purpose, field of application, classification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150
- [7] Bulavintseva A.D., Mazurkin P.M. *Raschet rabochey skorosti podachi aktivnogo navesnogo kustoreza v zavisimosti ot parametrov srezhaemogo kustarnika* [Calculation of the working feed rate of an active mounted brush cutter depending on the parameters of the cut bush]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 5, pp. 133–135.
- [8] Glushkov S., Popikov P.I., Malyukov S.V., Chakarov V., Boyadzhiev, D. Study of the work of a self-propelled mulcher in the preparation of forest soils for planting poplar in the conditions of Bulgaria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, p. 12006. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012006
- [9] Mohite D., Agrawal K., Kumar K., Deb A. Technical Aspects of Multipurpose Weed Cutter or Power Weeder. *IJERSTE*, 2021, v. 10, no 7, p. 33765. DOI: 10.13140/RG.2.2.11613.33765

- [10] Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A., Prokudina A.V., Grigor'eva O.I., Otmakhov D.V. *Izuchenie moshchnostnykh pokazateley i kachestva sreza sharnirno-sochlenennym i nozhevym rabochimi organami rotornogo kustoreza* [Study of power indicators and cutting quality of articulated and knife working bodies of a rotary brush cutter]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 2(58), pp. 7–13. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-7-13
- [11] Abdrazakov F.K. *Intensifikatsiya tekhnologiy i sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv v meliorativnom proizvodstve* [Intensification of technologies and improvement of technical means in melioration production]. Dis. D-r Sci. (Tech.) 05.20.01. Saratov, 2002, 572 p.
- [12] Abdrazakov F.K., Khal'metov A.A. *Sovershenstvovanie organizatsii i tekhnologii udaleniya drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti na orositel'nykh sistemakh s pomoshch'yu universal'nogo kustoreza* [Improvement of the organization and technology of removing woody and shrubby vegetation in irrigation systems using a universal brush cutter]. Saratov: SSAU named after N.I. Vavilov, 2013, 124 p.
- [13] Dadenko E.V. *Analiz i sintez optimal'nogo protsessa srezaniya kustarnika tsilindricheskoy frezoy kustoreza-izmel'chitelya* [Analysis and synthesis of the optimal process of cutting bushes with a cylindrical cutter of a brush cutter-shredder]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Rostov-on-Don, 1983, 21 p.
- [14] Zemlyanoy A.A. *Razrabotka i issledovanie lentochnoy rezhushchego apparata mashiny dlya konturnoy obrezki plodovykh derev'ev* [Development and study of a belt cutting apparatus of a machine for contour pruning of fruit trees]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.20.01. Michurinsk, 2022, 22 p.
- [15] Kurakin V.N. *Obosnovanie parametrov rabocheho organa dlya srezaniya kustarnika* [Justification of the parameters of the working element for cutting bushes]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Leningrad, 1990, p. 174.
- [16] Lushnikov M.V. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa i obosnovanie osnovnykh parametrov rotatsionno-konsol'nogo kustoreza dlya osvvetleniya lesnykh kul'tur na neraskorchevannykh vyrubkakh* [Improving the technological process and substantiating the main parameters of a rotary cantilever brush cutter for thinning forest crops in unstumped clearings]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Saratov, 2001, 197 p.
- [17] Mazurkin P.M. *Obosnovanie parametrov modul'nykh rabochikh organov lesozagotovitel'nykh mashin na nachal'nykh stadiyakh proektirovaniya* [Substantiating the parameters of modular working bodies of logging machines at the initial stages of design]. Dis. D-r Sci. (Tech.) 05.21.01. Yoshkar-Ola, 1995, 403 p.
- [18] Popikov V.P. *Obosnovanie parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya mashiny dlya formirovaniya kron derev'ev lesosemennykh plantatsiy* [Substantiating the parameters of the technological equipment of a machine for forming tree crowns in forest seed plantations]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh, 2009, 16 p.
- [19] Zavrazhnov A.A., Lantsev V.Yu., Egorov D.A., Zemlyanoy A.A. *Ispol'zovanie elektroprivoda v mashinakh dlya 3D konturnoy obrezki plodovykh derev'ev* [Using an electric drive in machines for 3D contour pruning of fruit trees]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Michurinsk State Agrarian University], 2012, no. 3, pp. 220–225.
- [20] Sukhanov Yu.V., Tsarev T.A., Vasil'ev A.S., Ivashnev M.V. *Stend dlya issledovaniy kharakteristik protsessa srezaniya* [A stand for studying the characteristics of the cutting process]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2021, no. 5(77), pp. 121–127.
- [21] Ivashnev M.V. *Matematicheskiy analiz kolebatel'nogo protsessa sharnirno-zakreplennogo nozha rotornogo kustoreza* [Mathematical analysis of the oscillatory process of a hinged knife of a rotary brush cutter]. *Vuzovskaya nauka — regionu: Mater. IV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [University science — to the region: Materials of the IV all-Russian scientific and technical conf.]. Vologda: VoGTU, 2006, v. 1, pp. 41–43.
- [22] Ivashnev M.V. *Matematicheskoe opisaniye protsessa raboty rotornogo kustoreza* [Mathematical description of the operation process of a rotary brush cutter]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the Saint Petersburg Forest Engineering Academy], 2007, no. 181, pp. 94–99.
- [23] Ivashnev M.V., Shegel'man I.R., Kolesnikov G.N. *K voprosu sovershenstvovaniya uzlov rotornykh kustorezov* [On the issue of improving the units of rotary brush cutters]. *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2014, no. 7(58), pp. 80–82.
- [24] Ivashnev M.V. *Teoreticheskie aspekty sozdaniya rotornykh mashin s nepreryvnyim srezaniem drevesno-kustarnikovoy rastitel'nosti* [Theoretical aspects of creating rotary machines with continuous cutting of woody and shrubby vegetation]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 5–3(10–3), pp. 127–130. DOI: 10.12737/6942
- [25] Ivashnev M.V., Kalinin R.K., Sukhanov Yu.V., Vasilyev A.S. *Protection of Linear Facilities Passing through Forest Territories. Components of Scientific and Technological Progress*, 2022, no. 9(75), pp. 9–11.
- [26] Drapalyuk M.V., Polev V.S. *Modelirovaniye rubyashchikh elementov tsepnogo kustoreza* [Modeling of cutting elements of a chain brush cutter]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2010, no. 6, pp. 94–98.
- [27] Bartenev I.M., Malyukov S.V. *Imitatsionnoye modelirovaniye raboty kustoreza* [Simulation modeling of brush cutter operation]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 5–1, pp. 192–194.
- [28] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E. *Sovremennoye programmnnoye obespecheniye dlya provedeniya issledovaniy po nagruzkam, ustoychivosti i prokhodimosti mashin* [Modern software for conducting research on machine loads, stability and cross-country ability]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 5–1(16–1), pp. 209–214. DOI: 10.12737/14490

- [29] Afonichev D.N., Pilyaev S.N. *Komp'yuternoe modelirovanie aktivnoy podveski transportnogo sredstva s pomoshch'yu programmy SimInTech* [Computer modeling of active vehicle suspension using the SimInTech program]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: Mater. nats. nauch. konf.* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: Materials of the national scientific conference], Voronezh, April 19–21, p. I. Voronezh: VSTU named after Emperor Peter I, 2022, pp. 24–37.
- [30] Bartenev I.M., Malyukov S.V. *Rezul'taty modelirovaniya raboty kustoreza, osnashchennogo uporami-ulavlivatelyami poroslevin* [Results of modeling the operation of a brush cutter equipped with stops-catchers for overgrowth]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2014, no. 3, pp. 9–12.
- [31] Bukhtoyarov L.D., Kunickaya O.I., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters. *J. of Applied Engineering Science*, 2022, v. 20, pp. 1–10. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>
- [32] Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D., Platonov A.A., Vakula E.Yu. *Imitatsionnaya model' rabocheho protsessa manipulyatora pri udaleni nezhelatel'noy rastitel'nosti vmeste s kornevoy sistemoy v lesnykh nasazhdeniyakh* [Simulation model of the work process of a manipulator when removing unwanted vegetation along with the root system in forest plantations]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2020, v. 17, no. 4, pp. 1–14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402
- [33] Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, v. 875, p. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>
- [34] 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, v. 595, p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012014>
- [35] Bartenev I.M., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Rotor kustoreza* [Brush cutter rotor]. Patent 2238637C1 RF, IPC A 01 G 23/06, applicant and patent holder VGLTA, No. 2003103223/12, filed 03.02.2003, published 27.10.2004.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Author's information

Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, vglta-mlx@yandex.ru

Received 16.05.2024.

Approved after review 03.10.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.