

УДК 630*36:621.9

С. А. Голякевич, Р. А. Карсюк
Белорусский государственный технологический университет
**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ
В ПРОЦЕССЕ ВАЛКИ ДЕРЕВА ХАРВЕСТЕРОМ**

В статье рассмотрены перспективы применения систем рекуперации в многооперационных лесозаготовительных машинах. Указано, что наиболее перспективной операцией для рекуперативного восстановления энергии является операция валки дерева. Проведено математическое моделирование процесса падения дерева с учетом сопротивления движению со стороны воздушной среды и рекуперативного момента. Установлено, что кинетическая энергия дерева в конце падения для сосны с таксационным диаметром 32 см может превышать 100 кДж. Замечено, что раннее включение процесса рекуперации приводит к значительному замедлению процесса валки (более чем в 2 раза) и низкому процентному показателю рекуперированной энергии (не более 15%). Выявлено, что увеличение рекуперативного момента непропорционально замедляет падение дерева и может вызвать его полную остановку.

Предложена и теоретически подтверждена гипотеза о том, что более позднее включение процесса рекуперации позволяет сохранить в допустимом диапазоне время валки дерева (до 6,5 с) и увеличить величину рекуперированной энергии от общей кинетической энергии до 98%. В этом случае начало процесса рекуперации соответствует углу поворота харвестерной головки относительно вертикальной оси, равному 45°.

В качестве побочного положительного эффекта процесса рекуперативного торможения дерева выявлено значительное уменьшение энергии удара дерева при его контакте с поверхностью земли. В заключении статьи приводятся рекомендации по дальнейшему исследованию процессов рекуперативного торможения на операциях технологического цикла лесозаготовительных машин. Для дальнейшего анализа предложены операции торможения ствола дерева при обрезке сучьев, торможения рабочих органов, в частности манипуляторов и др.

Ключевые слова: харвестер, дерево, падение, модель, дифференцирование, рекуперация, энергия, сопротивление воздуха, производительность, торможение.

S. A. Golyakevich, R. A. Karsyuk
Belarusian State Technological University
**ASSESSMENT OF THE POTENTIAL ENERGY RECOVERY
IN FELLING A TREE HARVESTER**

The article discusses the prospects of using recovery systems in multioperational forestry machines. It is indicated that the most promising operation for regenerative energy recovery is a tree felling operation. Mathematical modeling of the process of falling a tree was carried out taking into account the resistance to movement from the air and the regenerative moment. It was established that the kinetic energy of a tree at the end of a fall for pine with a taxation diameter of 32 cm can exceed 100 kJ. It is noted that the early inclusion of the recovery process leads to a significant slowdown in the felling process (more than 2 times) and a low percentage of recuperated energy (not more than 15%). It was revealed that an increase in the regenerative moment disproportionately slows down the fall of a tree and can cause it to stop completely.

A hypothesis was proposed and theoretically confirmed that the later inclusion of the recovery process allows you to save the tree felling time (up to 6.5 s) in the acceptable range and increase the amount of recuperated energy from the total kinetic energy to 98%. In this case, the beginning of the recovery process corresponds to a rotation angle of the harvester head relative to the vertical axis equal to 45°.

As a side positive effect of the regenerative braking process of the tree, a significant decrease in the energy of impact of a tree upon its contact with the surface of the earth was revealed. The article concludes with recommendations for further study of regenerative braking processes in operations of the technological cycle of forestry machines. For further analysis, we proposed the operations of braking a tree trunk when cutting branches, braking of working bodies, in particular manipulators, etc.

Keywords: harvester, tree, fall, model, differentiation, recovery, energy, air resistance, productivity, braking.

Введение. Одним из способов повышения энергетической эффективности мобильных машин является создание систем и механизмов, способных восстанавливать энергию, затраченную на совершение работы. Данный процесс принято именовать рекуперацией. Исследования возможностей рекуперации энергии движения машин различного назначения уделяется пристальное внимание ученых во многих отраслях промышленности [1–7]. На сегодняшний день механизмы рекуперации внедрены в легковые и грузовые электромобили, автомобили с гибридными силовыми установками и электропоезда. Принципы рекуперации, используемые в данных машинах, разнообразны, однако эффективность многих из них часто подвергается критике. Особенно скептически ученые относятся к эффективности рекуперации в легких электромобилях. Считается [8, 9], что малость тормозного пути в общем времени цикла движения машины не позволяет эффективно заряжать аккумуляторы, а величина рекуперированной энергии не превышает 1% от общего объема ее потребления, что не оправдывает затрат на оборудование машин такими системами.

Несмотря на широкое применение идеи рекуперации энергии в других отраслях, в специализированных лесных машинах она не получила достаточного распространения на современном этапе. Преимущественно это связано с недостаточным объемом исследований в области рекуперативных возможностей на лесопромышленных операциях. В настоящее время в странах европейского союза в рамках программы Horizon 2020 реализуется два обширных проекта (Tech4effect и Forwader 2020) с общим объемом финансирования свыше 1 млн евро, которые направлены на создание новых образцов мобильных лесных машин и повышение эффективности их работы. Зарубежные ученые считают, что наибольшим потенциалом повышения энергоэффективности обладают системы рекуперативного торможения [10–13]. К примеру, одной из целей программы Forwader 2020 является снижение на 30% потребления топлива форвардером на погрузочно-разгрузочных операциях за счет рекуперативного торможения при использовании манипулятора [14].

Ранее проведенные авторами исследования проблем технологической организации лесозаготовительного производства и эффективной эксплуатации лесных машин позволили сделать вывод о том, что помимо энергии непосредственного движения лесной машины эффективно рекуперироваться может и энергия других операций, присутствующих только в лесозаготовительном производстве. Потенциально возможными источниками энергии в этом случае

являются: падение дерева при валке, торможение ствола дерева при обрезке сучьев, торможение рабочих органов, в частности манипуляторов на погрузочно-разгрузочных операциях, и др.

Целью настоящей статьи является разработка методологической основы для проведения предварительного энергетического анализа операции валки дерева харвестером и получение данных о возможной продолжительности рекуперации и величине вырабатываемой энергии.

В качестве базовой машины, совершающей операцию валки дерева, принят харвестер Амкордор 2551, как наиболее часто используемый на рубках главного пользования в нашей стране.

Основная часть. Для оценки потенциала рекуперации разработана математическая модель падения дерева с учетом работы рекуперативного механизма. В качестве допущений принято, что ствол дерева представляет собой недеформируемое жесткое тело, сопротивление воздушной среды действует на крону дерева как сила, сосредоточенная в центре давления кроны и направленная перпендикулярно продольной оси ствола. Общая упрощенная схема математической модели падения дерева приведена на рис. 1.

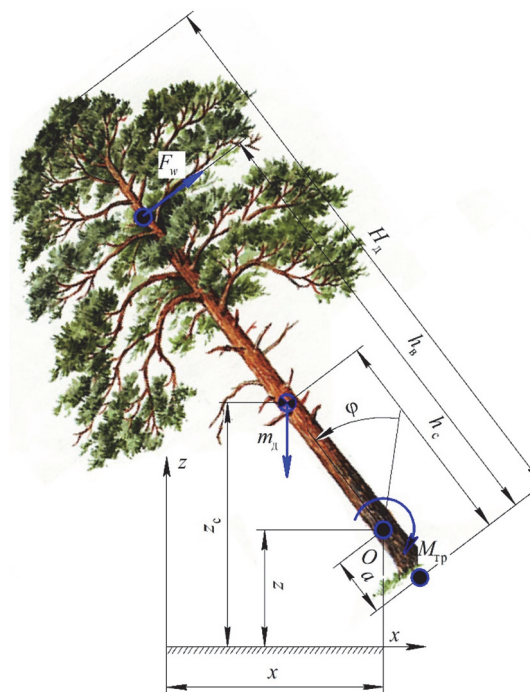


Рис. 1. Расчетная схема падения дерева при валке харвестером

В качестве параметров типичных деревьев приняты усредненные высоты сосны I разряда в зависимости от значений диаметра ствола на высоте 1,3 м ($d_{1,3}$) (таблица).

Значения коэффициентов функции сопротивления воздушной среды для различных таксационных параметров деревьев сосны

$d_{1,3}$, м	H_d , м	C_w	q_s	q_v
0,18	20,0	5,76	2,01	1,21
0,20	22,0	5,67	2,09	1,27
0,22	23,0	5,57	2,155	1,32
0,24	24,0	5,47	2,22	1,37
0,26	25,0	5,45	2,245	1,385
0,28	26,0	5,43	2,27	1,4
0,30	27,0	5,335	2,305	1,415
0,32	28,0	5,24	2,34	1,43
0,34	29,0	4,71	2,44	1,48
0,36	30,0	4,18	2,54	1,53

Для определения иных характеристик дерева, требуемых для моделирования его падения, использована методика, ранее изложенная в [15].

Диаметр дерева в плоскости срезания (м) определялся по соотношению

$$d_0 = q_0 d_{1,3},$$

где q_0 – коэффициент, учитывающий увеличение диаметра дерева в области спиливания (среднее значение коэффициента q_0 для сосны равно 1,25).

Длина ствола (H_c) меньше высоты дерева (H_d) на величину отрубаемой вершинной части (принята равной 2,5 м).

Масса (кг) надземной части дерева сосны включает массу ствола, сучьев и хвои. Масса ствола рассчитывалась по зависимости

$$m_c = V_c \rho_c,$$

где ρ_c – средневзвешенное значение плотности стволовой древесины сосны (820 кг/м³).

Для анализа энергетических характеристик падения дерева в первом приближении можно рассматривать его ствол как усеченный конус с соответствующим коэффициентом формы и видовым числом.

Высота центра тяжести ствола h_c (м) составляет 0,35 H_d .

Коэффициент формы ствола (q) для деревьев, чей центр тяжести находится на высоте 0,35 H_d , составляет 0,67.

Для определения объема ствола (хлыста) (м³) использована приближенная формула:

$$V_c = \frac{\pi}{8} (d_n^2 + d_b^2) H_c,$$

где d_b – диаметр хлыста в верхнем отрубе (0,06 м).

Высота дерева определена по таксационным таблицам [16] и приведена в таблице.

Масса кроны m_k в зависимости от массы дерева для сосны принята равной 15%.

Момент инерции дерева относительно оси его поворота при валке:

$$I_0 = 0,185 m_c h_c^2.$$

Сила сопротивления падению дерева со стороны воздушной среды может быть приближенно определена по выражению

$$F_w = C_w \frac{m q_v}{2 q_s} \dot{\varphi}^m (d_0 H_d q_s)^m,$$

где d_0 – диаметр дерева в плоскости среза, м; m – показатель степени скорости в законе сопротивления воздушной среды; C_w , q_w и q_s – расчетные коэффициенты (таблица).

Величина показателя m для деревьев с кроной составляет:

$$m = 2,03 - 0,65 l_k / H_d,$$

где l_k – протяженность кроны дерева, м, для расчетов принята величина $l_k = 1/5 H_d$.

Высота положения центра давления (м) воздушной среды на дерево сосны составляет $h_b = 0,8 H_d$.

Кинетическая энергия дерева в каждый момент времени находится по известной зависимости:

$$T_d = \frac{I_0 \dot{\varphi}^2}{2}.$$

Дифференциальное уравнение движения дерева под действием названных сил имеет вид:

$$\ddot{\varphi} = \begin{cases} \frac{-C_w \frac{m q_v}{2 q_s} \dot{\varphi}^m (d_0 H_d q_s)^m \varphi + m_d g h_c \sin(\varphi) - M_{\text{рек}}}{0,185 m_d h_c^2}, & \text{если } 0 < \varphi \leq \frac{\pi}{2}; \\ 0, & \text{если } \frac{\pi}{2} < \varphi. \end{cases}$$

Моделирование падения дерева в поле сил тяжести при действии силы сопротивления воздушной среды и момента рекуперативного устройства проводилось в программном пакете MathCad 14. В качестве начальных условий принято отклонение продольной оси дерева от вертикали на угол $\varphi = 0,1^\circ$ и отсутствие начальной угловой скорости его движения.

Организация процесса рекуперации на операции валки дерева возможна на основе использования механизмов вращательного или поступательного действия. В случае рекуперации в электрическую энергию – это генераторы,

а для гидравлической энергии можно использовать существующие гидроцилиндры подъема-опускания харвестерной головки с переводом их работы при сжатии в контур гидравлического рекуператора. При этом для процесса рекуперации важна не только конечная величина вырабатываемой энергии, но и потенциально возможная продолжительность ее накопления.

Поскольку рекуперативный момент $M_{рек}$ является моментом сопротивления падению дерева, то чрезмерное повышение его величин и раннее возникновение может привести к полной остановке процесса валки. Это должно учиты-

ваться при разработке подобных систем. В данной связи анализ процесса валки дерева с рекуперированием его кинетической энергии проведен для моментов начала рекуперации, соответствующих углам поворота $\varphi_{н.рек} = \pi/32$ (рис. 2), $\pi/16$, $\pi/8$ и $\pi/4$.

Сравнительная характеристика процессов падения дерева с различными моментами рекуперации (3,5–7,5 кН·м) показывает (рис. 2, а), что при начале процесса рекуперации, соответствующем углу поворота харвестерной головки $\varphi_{н.рек} = \pi/32$, максимально возможная величина рекуперированной энергии составляет не более $E_{рек} = 9,1$ кДж.

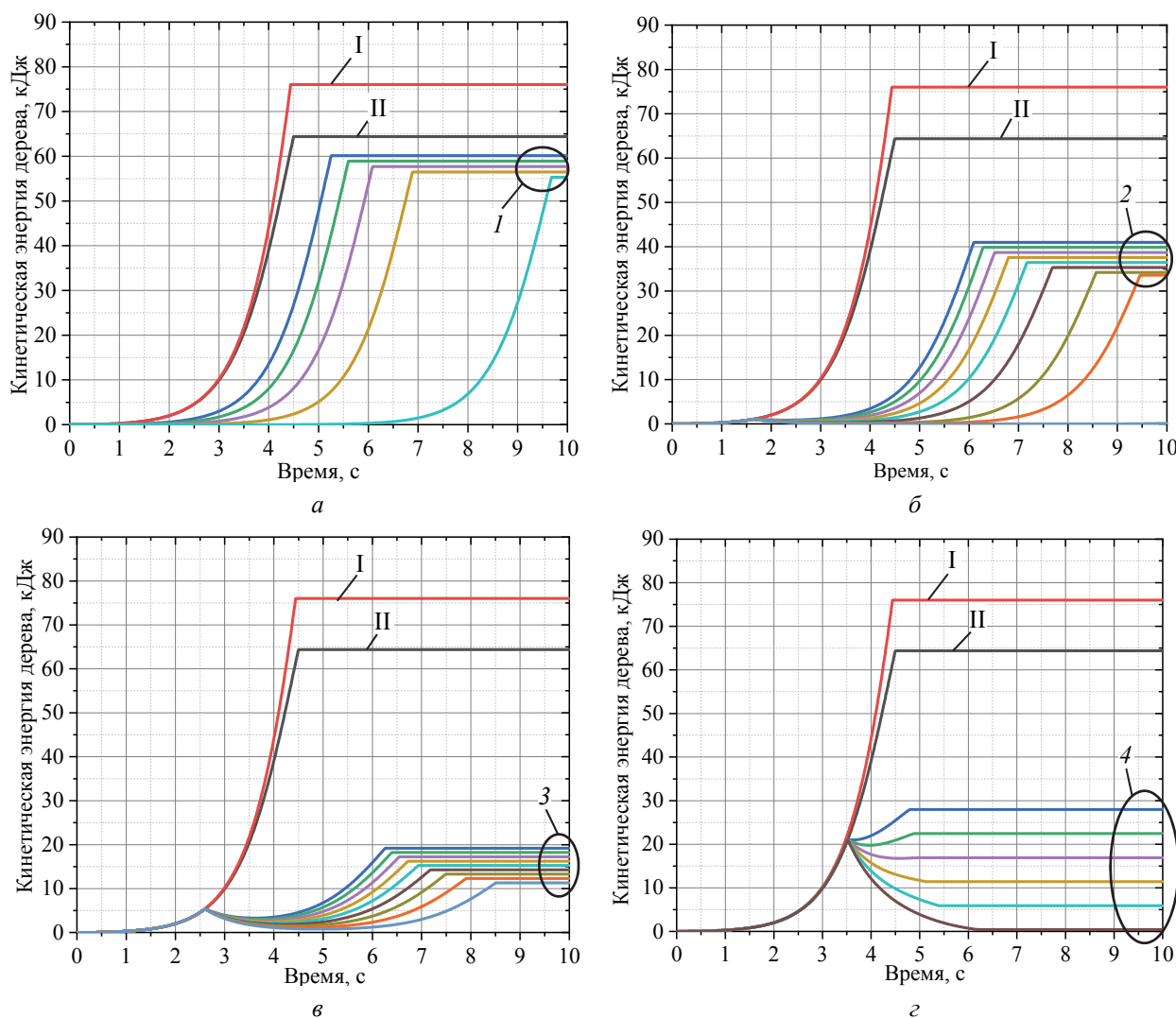


Рис. 2. Рекуперативный потенциал $E_{рек}$ энергии падения дерева для различных углов начала рекуперации $\varphi_{н.рек}$:

а – $\varphi_{н.рек} = \pi/32$; б – $\varphi_{н.рек} = \pi/16$; в – $\varphi_{н.рек} = \pi/8$; г – $\varphi_{н.рек} = \pi/4$, и различных моментов рекуперации $M_{рек}$, равных:

1 – 3,5–7,5 кН·м (с шагом 1 кН·м); 2 – 20,5–27,3 кН·м (с шагом 1 кН·м); 3 – 45,5–53,5 кН·м (с шагом 1 кН·м); 4 – 52,5–92,5 кН (с шагом 8 кН·м);

I – кинетическая энергия падения дерева без учета сил сопротивления воздушной среды; II – кинетическая энергия падения дерева с учетом сил сопротивления воздушной среды

В этом случае момент рекуперации достигает величины $7,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$, а продолжительность падения дерева увеличивается с $4,5$ до $9,7$ с. Такое увеличение времени выполнения операции валки не приемлемо для интенсивной и производительной работы харвестера. При $M_{\text{рек}} = 7,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ величина рекуперированной энергии составляет около 15% кинетической энергии дерева, а большее увеличение $M_{\text{рек}}$ приводит к прекращению процесса падения дерева.

В процессе моделирования установлено, что прирост продолжительности падения дерева не пропорционален приросту рекуперированной энергии. Так, при $M_{\text{рек}} = 6,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ рекуперированная до $E_{\text{рек}} = 7,88 \text{ кДж}$ энергии при продолжительности валки $t_{\text{в}} = 6,9$ с, а при $M_{\text{рек}} = 5500 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – $E_{\text{рек}} = 6,67 \text{ кДж}$ и $t_{\text{в}} = 6,1$ с.

Поскольку в начальный момент времени дерево не обладает достаточной кинетической энергией, даже относительно небольшой момент рекуперации действует как стабилизирующий и препятствует падению дерева. Поэтому была сформулирована гипотеза, что более позднее начало процесса рекуперации может позволить рекуперировать большую энергию, при этом незначительно увеличивая время падения дерева. Действительно, при $\varphi_{\text{н.рек}} = \pi/16$ (рис. 2, б) возможно существенно увеличить реализуемый момент $M_{\text{рек}}$ до $27 \text{ кН}\cdot\text{м}$ без остановки падения дерева и соответственно увеличить энергию $E_{\text{рек}}$ до $30,77 \text{ кДж}$. При $M_{\text{рек}} = 20,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ энергия $E_{\text{рек}}$ составляет $23,38 \text{ кДж}$, а $t_{\text{в}} = 6,1$ с, т. е. смещение начала рекуперации всего с $17,7$ до $35,4^\circ$ позволяет увеличить величину рекуперированной энергии более чем в 3 раза при сопоставимой продолжительности процесса валки.

Смещение начала процесса рекуперации в $\varphi_{\text{н.рек}} = \pi/8$ (рис. 2, в) позволяет реализовывать рекуперативные моменты вплоть до $M_{\text{рек}} = 53,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и рекуперировать до 82,5% энергии падения дерева.

Характерным является процесс с $\varphi_{\text{н.рек}} = \pi/4$ (рис. 2, г). К моменту начала рекуперации дерево обладает начальной кинетической энергией в 21 кДж . Позднее начало рекуперации позволяет восстановить до 98% потенциальной энергии дерева (около 64 кДж) при продолжительности валки не более $6,2$ с. Особенностью данного процесса является постепенное уменьшение энергии падения дерева от момента начала рекуперации. К моменту касания дерева горизонтальной поверхности земли его кинетическая энергия составляет всего 413 Дж . Поэтому косвенным положительным эффектом процесса рекуперации следует считать возможность плавного демпфирования падения дерева, что позволяет снизить нагрузки, действующие на рабочие органы харвестера.

Замедленное движение дерева на участке от начала рекуперации до контакта с поверхностью также приводит к более низкой силе сопротивления воздушной среды, так как она пропорциональна скорости движения. Это позволяет дополнительно рекуперировать до 10 кДж энергии за счет уменьшения ее рассеивания силами сопротивления воздушной среды.

Стоит отметить, что для достижения такой эффективности торможения требуется реализация весьма значительных рекуперативных моментов. Вопросы создания механизмов, способных их обеспечить, должны быть изучены дополнительно, как это сделано для устройств рекуперации в иных областях [17]. При этом достигаемый эффект должен быть проанализирован в полном цикле работы машины [18, 19], с учетом работы иных систем, повышающих эффективность харвестера [20]. Сама же рекуперированная энергия может быть накоплена в пневмогидравлическом аккумуляторе мембранного типа. Их производство налажено ведущими мировыми производителями в данной области (Bosch, Parker, EST, Eaton, Hydac). Данные гидравлические аккумуляторы имеют рабочее давление до 40 МПа , обеспечивают высокую «плотность» накопленной энергии (до 195 кДж/л) и производятся с объемом до 50 л , что способно полностью обеспечить потребности в накоплении рекуперированной энергии. Масса таких гидравлических аккумуляторов варьируется в широком диапазоне: от 45 кг для 9-литрового баллона до 167 кг для 48-литрового.

Заключение. Таким образом, в статье даны теоретические предпосылки к практической реализации процесса рекуперации энергии падения дерева. В эксплуатационных условиях Республики Беларусь при обработке каждого дерева может рекуперироваться до 64 кДж энергии. Область ее последующего использования в приводах харвестеров достаточно широка. Среди наиболее перспективных – компенсация запаздывания процесса регулирования гидронасосов во время начала работы нескольких объемных гидравлических потребителей; привод малообъемных потребителей (пильные механизмы, ротаторы, поворотные устройства манипуляторов и т. д.), питание дополнительного оборудования (освещение, кондиционирование и т. п.) после преобразования в электрическую энергию. Вывод об эффективности такого процесса с использованием штатной гидравлической системы, оборудованной гидроаккумуляторами, можно сделать только после детального анализа энергетического баланса харвестера на всех операциях и потенциала реализации его энергетических характеристик в разных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck // SAE Technical Paper 2007-01-4151. Allegeini: Evoqua Water Technologies LLC, 2007. 17 p.
2. Боднарь И. В., Евграфов С. В., Князев И. М. Возможности рекуперации энергии в транспортно-технологических машинах // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Омск, 7–9 дек. 2016 г. Омск: СибАДИ, 2016. С. 497–502.
3. Набокин А. В., Посметьев В. И., Никонов В. О. Повышение эффективности автомобилей за счет рекуперации энергии их агрегатов и систем // Воронежский научно-технический вестник. 2019. Т. 4, № 4 (18). С. 11–19.
4. Никонов В. О., Посметьев В. И., Латышева М. А. Состояние проблемы и обзор конструкций транспортных средств с системами рекуперации энергии торможения // Воронежский научно-технический вестник. 2018. Т. 2, № 2 (24). С. 4–19.
5. Бажанов В. И., Сгадлев А. М. Анализ эффективности гидравлической системы рекуперации энергии торможения автомобиля // Символ науки. 2016. № 9-1 (21). С. 20–23.
6. Васьковский Ю. Н., Пода М. В. Моделирование электромеханических систем рекуперации энергии колебаний транспортных средств // Технічна електродинаміка. 2019. № 4. С. 33–41.
7. Посметьев В. И., Никонов В. О. Имитационное моделирование рекуперации гидравлической энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве лесовозного тягача с полуприцепом // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2019. Т. 7, № 3 (46). С. 213–220.
8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy regeneration scheme and self-powered criterion of motor-driven active suspension // 35th Chinese Control Conference, Chengdu China, 27–29 July, 2016. Chengdu China, 2016. P. 8926–8931.
9. Быкадоров А. Л., Заруцкая Т. А., Карбинов А. В. К вопросу о качестве избыточной энергии рекуперации // Совершенствование организации и управления перевозками в условиях реформ: межвуз. сб. науч. тр. Ростов, 2002. С. 212–215.
10. Никонов В. О., Посметьев В. И. Рекуперация гидравлической энергии стрелы гидроманипулятора лесовозного автомобиля // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 177–183.
11. Geiger C., Geimer M. Efficiency optimisation of a forestry crane by implement hydraulics with energy recovery // VDI-MEG – 75th International Conference on Agricultural Engineering. LANDTECHNIK AgEng 2017. The Forum for Agricultural Engineering Innovations, Hannover, 10–11, November, 2017. Hannover, 2017. P. 175–184.
12. Попиков П. И. Моделирование рабочих процессов энергосберегающего гидропривода технологического оборудования лесотранспортной машины // Лесотехнический журнал. 2015. № 1. С. 225–234.
13. Башкиров В. А. Параметры аккумуляторной установки системы рекуперации энергии опускания рабочего оборудования экскаватора // Строительные и дорожные машины. 1989. № 1. С. 10–12.
14. Официальный сайт проекта Forwarder 2020. URL: <https://www.forwarder2020-project.eu> (дата обращения 03.03.2020).
15. Голякевич С. А., Горонковский А. Р. Основы проектирования лесных машин и системы автоматизированного проектирования. Минск: БГТУ, 2016. 139 с.
16. Мирошников В.С. Справочник таксатора. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
17. Рябов И. М., Ширяев С. А., Юсупов Ю. Г. Формирование структуры пневмогидравлической системы рекуперации и энергии торможения мобильной машины, обеспечивающей высокую надежность // Материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Владикавказ, 30 сент. – 1 окт. 2016 г. / ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет». Владикавказ, 2016. С. 114–119.
18. Голякевич С. А., Горонковский А. Р. Аспекты топливной экономичности многооперационных лесных машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Могилев, 27–28 апр. 2017 г. Могилев: Беларус. Рос. ун-т, 2017. С. 207–208.
19. Голякевич С. А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 26–28 апр. 2017 г. Минск: БГТУ, 2017. С. 64–68.
20. Голякевич С. А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2 (198). С. 238–244.

References

1. Kim Y. J., Filipi Z. Simulation study of a series hydraulic hybrid propulsion system for a light truck. *SAE Technical Paper 2007-01-4151*. Allegeini, Evoqua Water Technologies LLC Publ., 2007. 17 p.
2. Bodnar' I. V., Evgrafov S. V., Knyazev I. M. Possibilities of energy recovery in transport and technological vehicles. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy komplekсы: problemy, perspektivy, novatsii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: International materials scientific and technical conference], Omsk, 2016, pp. 497–502 (In Russian).
3. Nabokin A. V., Posmet'ev V. I., Nikonov V. O. Improving the efficiency of cars through the recovery of energy from their units and systems. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Voronezh scientific and technical bulletin], 2019, no. 4 (18), pp. 11–19 (In Russian).
4. Nikonov V. O., Posmet'ev V. I., Latysheva M. A. Problem status and overview of vehicle structures with braking energy recovery systems. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Voronezh scientific and technical bulletin], 2018, no. 2 (24), pp. 4–19 (In Russian).
5. Bazhanov V. I., Sgadlev A. M. Analysis of the effectiveness of the hydraulic system for recovering vehicle braking energy. *Simvol nauki* [Symbol of science], 2016, no. 9–1 (21), pp. 20–23 (In Russian).
6. Vas'kovskiy Yu. N., Poda M. V. Modeling of electromechanical vehicle energy recovery systems. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamic], 2019, no. 4, pp. 33–41 (In Russian).
7. Posmet'ev V. I., Nikonov V. O. Simulation of hydraulic energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device of a forest tractor with a semitrailer. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2019, vol. 7, no. 3 (46), pp. 213–220 (In Russian).
8. Yan Shuai, Sun Weichao. Energy regeneration scheme and self-powered criterion of motor-driven active suspension. *35th Chinese Control Conference*, Chengdu China, 2016, pp. 8926–8931.
9. Bykadorov A. L., Zarutskaya T. A., Karbinov A. V. To the question of the quality of excess energy recovery. *Sovershenstvovanie organizatsii i upravleniya perevozkami v usloviyakh reform: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Improving the organization and management of transportation in the context of reform: an inter-university collection of scientific papers], Rostov, 2002, pp. 212–215 (In Russian).
10. Nikonov V. O., Posmet'ev N. I. Recovery of hydraulic energy of a boom of a hydraulic manipulator of a forest truck. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2018, vol. 6, no. 4 (40), pp. 177–183 (In Russian).
11. Geiger C., Geimer M. Efficiency optimisation of a forestry crane by implement hydraulics with energy recovery. *VDI-MEG – 75th International Conference on Agricultural Engineering. LANDTECHNIK AgEng 2017. The Forum for Agricultural Engineering Innovations*. Hannover, 2017, pp. 175–184.
12. Popikov P. I. Modeling of working processes of energy-saving hydraulic drive of technological equipment of a forest transport machine. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry journal], 2015, no. 1, pp. 225–234 (In Russian).
13. Bashkirov V. A. Parameters of the battery installation of the energy recovery system for lowering the excavator working equipment. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road cars], 1989, no. 1, pp. 10–12 (In Russian).
14. Official site of project Forwarder 2020. Available at: <https://www.forwarder2020-project.eu> (accessed 03.03.2020).
15. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. *Osnovy proektirovaniya lesnykh mashin i sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Basics of forest machinery design and computer-aided design]. Minsk, BSTU Publ., 2016. 139 p.
16. Miroshnikov V. S. *Spravochnik taksatora* [Directory of taxotere]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p.
17. Ryabov I. M., Shiryayev S. A., Yusupov Yu. G. Formation of the structure pneumohydraulic system of recovery and braking energy of a mobile machine, providing high reliability. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGBOU VO "Gorskiy gosagrouniversitet"* [Materials of the international scientific-practical conference of Gorsky State Agro-University], Vladikavkaz, 2016, pp. 114–119 (In Russian).
18. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Fuel economy aspects of multioperational forest machines. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of the International scientific and technical conference], Mogilev, 2017, pp. 207–208 (In Russian).

19. Golyakevich S. A. Energy aspects of multioperational forest machines functioning. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging production: problems and solutions: materials of International scientific and technical conference]. Minsk, 2017, pp. 64–68 (In Russian).

20. Golyakevich S. A. Application of adaptive control systems to increase the realization of energy potential of harvesters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, no. 2 (198), pp. 238–244 (In Russian).

Информация об авторах

Голякевич Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gsa@belstu.by

Карсюк Роман Александрович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karsiuk@belstu.by

Information about the authors

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gsa@belstu.by

Karsyuk Roman Aleksandrovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karsiuk@belstu.by

Поступила 10.03.2020