

**ПОТЕНЦИАЛ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДАХ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

Голякевич С. А., доц., к.т.н., Гороновский А. Р., доц., к.т.н., Карсюк Р. А., студ.
Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь), e-mail: gsa@belstu.by

POTENTIAL ENERGY RECOVERY IN THE DRIVE FOREST MACHINES
Golyakevich S. A., Assoc. Prof., PhD, Goronovsky A.R., Assoc. Prof., PhD, Karsyuk R. A. stud.
Belarusian State Technological University
(Minsk, Republic of Belarus)

Аннотация. 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.

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

Abstract. 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.

Key words: 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. Исследованию возможностей рекуперации энергии движения машин различного назначения уделяется пристальное внимание ученых во многих отраслях промышленности [1–7]. На сегодняшний день механизмы рекуперации внедрены в легковых и грузовых электромобилях, автомобилях с гибридными силовыми установками и электропоездах. 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.

Не смотря 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 объемам исследований в области рекуперативных возможностей на лесопромышленных операциях. В настоящее время в странах европейского союза в рамках программы Horizon 2020 реализуется 2 обширных проекта (Tech4effect и Forwarder 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 Forwarder 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.

В рамках настоящей статьи проведен предварительный энергетический анализ операции валки дерева харвестером. Получены данные о возможной продолжительности рекуперации и величине вырабатываемой энергии. В качестве базовой машины, совершающей операцию валки дерева, принят харвестер Амкодор 2551, как наиболее часто используемый на рубках главного пользования в нашей стране.

Материалы и методы. 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 направлена перпендикулярно продольной оси ствола. Общая упрощенная схема математической модели падения дерева приведена на рисунке 1.

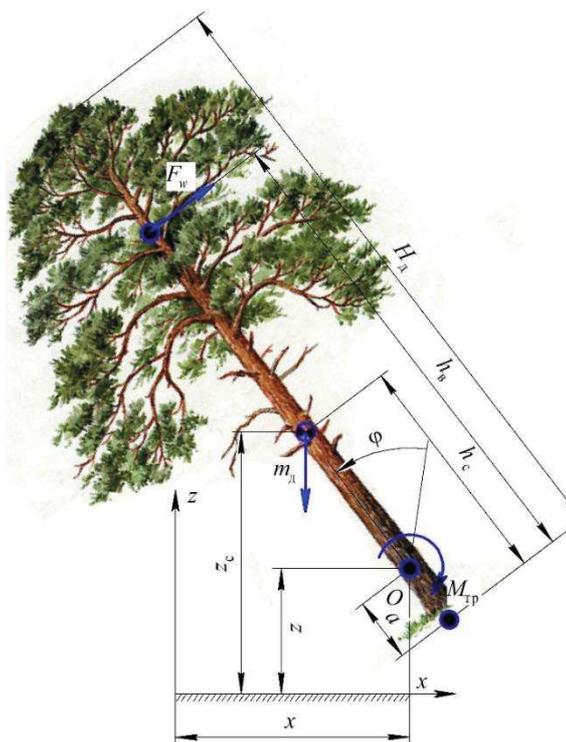


Рисунок 1 – Расчетная схема падения дерева при валке харвестером

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 1.

Таблица 1 – 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 среза (м) определялся по соотношению:

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

где q_0 – коэффициент, учитывающий увеличение диаметра дерева в области спиливания (средние значения коэффициента q_0 для сосны равны– 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 $0,35H_d$. Коэффициентом формы ствола (q) для деревьев, чей центра тяжести находится на высоте $0,35H_d$ составляет 0,67.

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

$$V_c = \frac{\pi}{8} (d_{\text{п}}^2 + d_{\text{в}}^2) H_c,$$

где $d_{\text{в}}$ – диаметр хлыста в верхнем отрубе (0,06 м).

Высота дерева определена по таксационным таблицам [16] и приведена в таблице 1. Масса кроны m_k в зависимости от массы дерева для сосны принята равной 15%.

Момент инерции дерева относительно оси его поворота при валке:

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

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 1).

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:

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

Дифференциальное уравнение движения дерева под действием названных сил имеет вид:

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

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

Результаты. Сравнительная характеристика процессов падения дерева с различными моментами рекуперации (3,5–7,5 кН·м) показывает (рисунок 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.

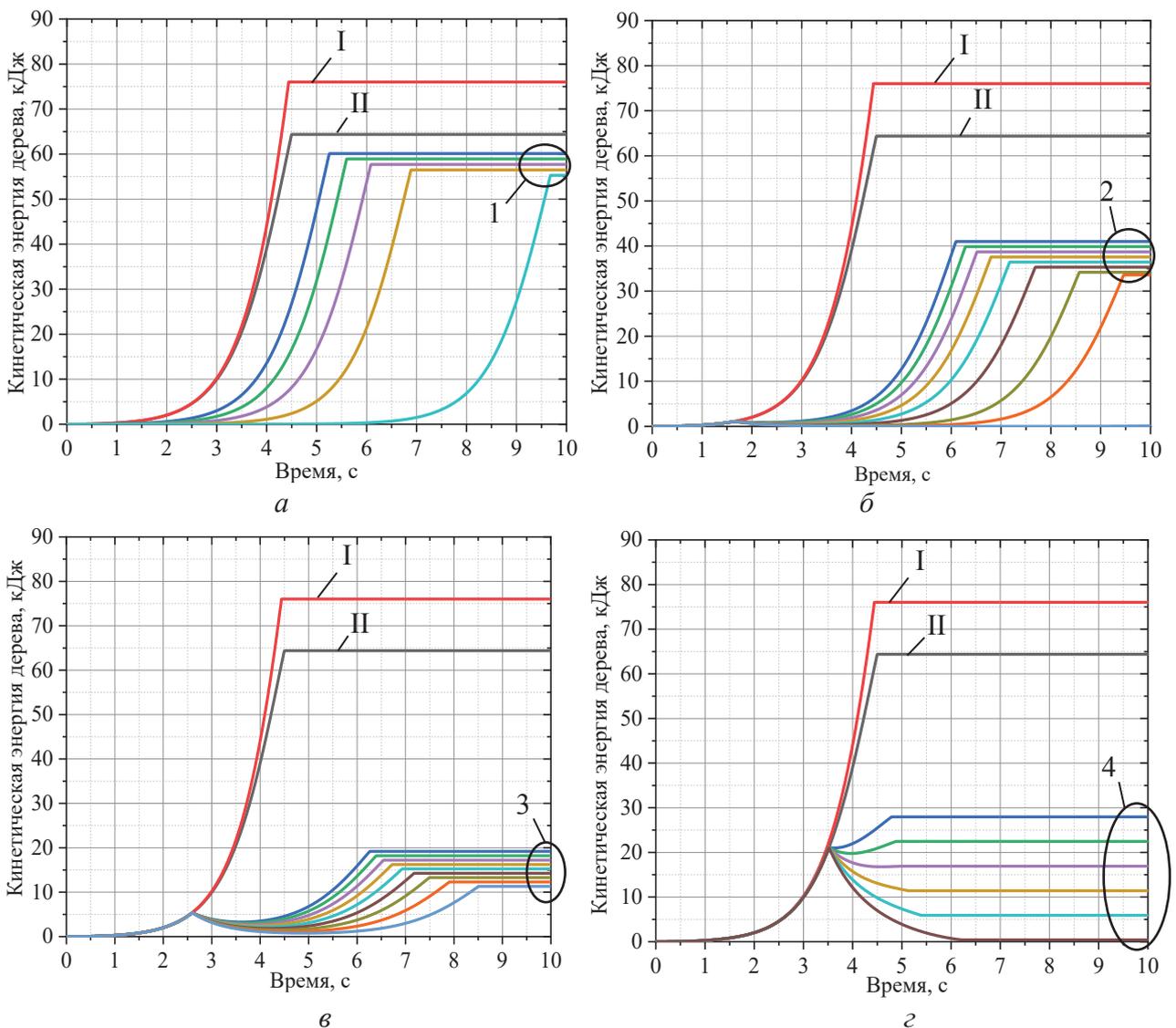
В этом случае момент рекуперации достигает величины 7,5 кН·м, а продолжительность падения дерева увеличивается с 4,5 до 9,7 с. Такое увеличение времени выполнения операции валки не приемлемо для интенсивной и производительной работы харвестера. При $M_{рек} = 7,5$ кН·м величина рекуперированной энергии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

В процессе моделирования установлено, что прирост продолжительности падения дерева не пропорционален приросту рекуперированной энергии. Так, при $M_{рек} = 6,5$ кН·м рекуперированная энергия до $E_{рек} = 7,88$ кДж при продолжительности валки $t_b = 6,9$ с, а при $M_{рек} = 5500$ Н·м – $E_{рек} = 6,67$ кДж и $t_b = 6,1$ 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 больше энергии и при этом не значительно увеличивая время падения дерева. Действительно при $\varphi_{н,рек} = \pi/16$ (рисунок 2, б) возможно существенно увеличить реализуемый момент $M_{рек}$ до 27 кН·м без остановки падения дерева и соответственно увеличить энергию $E_{рек}$ до 30,77 кДж. При $M_{рек}=20,5$ кН·м энергия $E_{рек}$ составляет 23,38 кДж, а $t_b = 6,1$ с., т.е. смещение начала рекуперации всего с $17,7^\circ$ до $35,4^\circ$ позволяет увеличить величину рекуперированной энергии более чем в 3 раза при сопоставимой продолжительности процесса валки.

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

Характерным является процесс с $\varphi_{н,рек} = \pi/4$ (рисунок 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.



$a - \varphi_{н.рек} = \pi/32$; $б - \varphi_{н.рек} = \pi/16$; $в - \varphi_{н.рек} = \pi/8$; $г - \varphi_{н.рек} = \pi/4$;

$I - 3,5 - 7,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ (с шагом $1 \text{ кН}\cdot\text{м}$); $2 - 20,5 - 27,3 \text{ кН}\cdot\text{м}$ (с шагом $1 \text{ кН}\cdot\text{м}$); $3 - 45,5 - 53,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$ (с шагом $1 \text{ кН}\cdot\text{м}$); $4 - 52,5 - 92,5 \text{ кН}$ (с шагом $8 \text{ кН}\cdot\text{м}$);

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

II – кинетическая энергия падения дерева с учетом сил сопротивления воздушной среды

Рисунок 2 – Рекуперативный потенциал $E_{рек}$ энергии падения дерева для различных углов начала рекуперации $\varphi_{н.рек}$ и для различных моментов рекуперации $M_{рек}$ равных

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

Обсуждение. 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 либо, в перспективе, по средством системы суперконденсаторов. Производ-

ство гидроаккумуляторов 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. Область использования полученной при рекуперации энергии 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.

ЛИТЕРАТУРА

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. Боднар 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., Омск, 7–9 декабря 2016. 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. Васильковский 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. pp. 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: межвузовский сборник научных трудов. Ростов. 2002. С. 212–215

10. Никонов В. О., Посметьев В. И. Рекуперация гидравлической энергии стрелы гидоманипулятора 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 pp. 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. Forwarder 2020 // Официальный сайт проекта Forwarder 2020. URL: <https://www.forwarder2020-project.eu> (дата обращения 03.03.2020).
15. Голякевич С. А., Гороновский 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 международной научно-практической конференции ФГБОУ ВО «Горский госагроуниверситет», Владикавказ, 30 сентября – 1 октября 2016. Владикавказ, ФГБОУ ВО ГАУ. С. 114–119
18. Голякевич, С.А. Гороновский А.Р. Аспекты топливной экономичности многооперационных лесных машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апреля 2017. Могилев: ГУ ВПО Белорус. Рос. ун–т. С. 207–208.
19. Голякевич С. А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Минск, 26–28 апреля 2017. 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.