

УДК 630*36.001.6

С. А. Голякевич, А. Р. Гороновский

Белорусский государственный технологический университет

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РУБИЛЬНОЙ МАШИНЫ
НА ОПЕРАЦИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ**

В статье приведены результаты исследований эффективности эксплуатации рубильной машины на операции измельчения древесины. Описаны потенциальные условия эксплуатации машин на нижних складах, лесосеках и при изменяющихся условиях. Рассмотрены приводы с различной номинальной мощностью под управлением системы «No stress». В качестве критерия оценки эффективности предложено использовать функции энергетического потенциала операций для постоянных и переменных условий эксплуатации. Определены области эффективного использования приводов различной мощности и даны рекомендации по их применению на практике. Установлены закономерности изменения эффективности процессов измельчения для приводов мощностью 138 кВт, 238 кВт, 338 кВт. Показано, что при срабатывании системы управления «No stress» эффективность процесса измельчения значительно снижается и работа рубильной машины на таких режимах допустима лишь в исключительных случаях. Кроме того, характер кривых падения эффективности (функции ЭП) на участках срабатывания системы управления не зависит от номинальной мощности двигателя. Установлено, что при работе с тонкомерной древесиной большая эффективность достигается при использовании привода меньшей номинальной мощности, но не менее необходимой для работы барабана без срабатывания системы «No stress».

Ключевые слова: рубильная машина, модель, режим, система управления «No stress», привод, управление, алгоритм, Matlab, Simulink.

S. A. Golyakevich, A. R. Goronovskiy

Belarusian State Technological University

**ENERGY ANALYSIS OF OPERATIONS MODES OF CHIPPER
ON OPERATION MILLING OF WOOD MATERIALS**

The article presents the results of studies of the efficiency of operation of the chopping machine in the operation of wood chopping. Potential operating conditions of machines in lower warehouses, cutting areas and under changing conditions are described. Drives with different rated power under control of the «No stress» system are considered. It is proposed to use the functions of the energy potential of operations for constant and variable operating conditions as a criterion for evaluating efficiency. The areas of efficient use of drives of various powers are determined and recommendations for their practical application are given. The laws of changing the efficiency of grinding processes for drives with a capacity of 138 kW, 238 kW, 338 kW are established. It is shown that when the «No stress» control system is activated, the efficiency of the grinding process is significantly reduced and the operation of the chipper in such modes is permissible only in exceptional cases. In addition, the nature of the curves of the drop in efficiency (EP function) in the response areas of the control system does not depend on the rated engine power. It was found that when working with fine wood, greater efficiency is achieved by using a drive with a lower rated power, but no less necessary for the drum to work without operating the «No stress» system.

Key words: chipper, model, mode, control system «No stress», drive, control, algorithm, Matlab, Simulink.

Введение. Для измельчения древесного сырья в щепу лесопромышленными предприятиями используются мобильные и стационарные рубильные машины [1–4]. Условия их эксплуатации существенно отличаются ввиду значительного разнообразия перерабатываемого древесного сырья. В зависимости от технологического процесса предприятия это могут быть отходы лесопильного производства: горбыли, рейки и т. п., лесосечные отходы: сучья, ветви, вершины, тонкомерная древесина, фаутная древесина, дровяное сырье и т. д. [5–8]. Значительные отличия

в виде измельчаемого сырья, его концентрации и степени разнообразия определяют различия в требованиях к рубильным установкам. В рамках данной статьи выполним энергетический анализ работы рубильного модуля мобильной рубильной машины «АМКОДОР 2904». Исходные данные для анализа получены на основе предварительного имитационного компьютерного моделирования в системе Matlab/ Simulink. Этапы моделирования, принятые допущения и возможности имитационной модели подробно изложены в предыдущей статье.

Основная часть. Оценка эффективности операции по измельчению древесного сырья проведена для фаутной ствольной древесины различных геометрических размеров. При анализе не учитывалось влияние иных потребителей энергии, кроме непосредственно рубильного барабана. Подача древесного сырья считалась мгновенной и не зависела от работы манипулятора. Работа подающего транспортера описывалась моделью системы «No stress» без задержек.

В качестве оценочных показателей эффективности использованы следующие единичные величины: энергетический коэффициент полезного действия (КПД) барабана, основанный на выполненной им работе как физической величине, и временной КПД барабана, учитывающий затраты времени на измельчение и времени холостого выбега.

В целом рубильная машина является машиной циклического действия с чередующимися операциями подачи сырья манипулятором, подающим транспортером и непосредственным измельчением. При этом отдельно выбранную операцию измельчения древесного сырья следует представлять в виде условно непрерывного процесса. В нем полезная работа прерывается в случае срабатывания системы «No stress» во время повторного разгона барабана до заданной частоты вращения.

В качестве интегрального критерия оценки использована величина реализованного энергетического потенциала (ЭП, %) [9–12]:

$$\text{ЭП} = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}} \frac{t_{\text{раб}}}{T_{\text{полн}}},$$

где $A_{\text{полезн}}$ – полезная работа, выполненная рубильным барабаном за определенный промежуток времени, Дж; $A_{\text{полн}}$ – полная работа, выполненная приводом рубильного барабана, Дж; $t_{\text{раб}}$ – продолжительность выполнения полезной работы; $T_{\text{полн}}$ – полная продолжительность операции.

При анализе режимов работы учтено потребление энергии двигателем на поддержание собственной работы в размере 10% от номинальной величины.

Анализ виртуального эксперимента, проведенного с использованием имитационной модели, позволил установить следующие особенности режимов работы рубильной машины. Первоначальный рост нагрузки на рубильном барабане до 2350 Н·м (рис. 1) вызывает нелинейный рост реализуемого машиной энергетического потенциала с 0,465 до 0,890 (без учета иных операций технологического цикла). С учетом постоянства на данном участке временного КПД (0,97) этот факт обусловлен исключительно нелинейным изменением

энергетического КПД машины вследствие повышения загруженности рубильного барабана и большей полезной работой, выполняемой в единицу времени.

После достижения порога максимального крутящего момента двигателя на его номинальной частоте вращения происходит нелинейное снижение энергетического КПД и ЭП машины (участок II, рис. 1). Основное влияние на качественное изменение кривых ЭП и энергетического КПД на данном участке оказывает величина момента инерции барабана и, соответственно, его кинетическая энергия. Действующие на данном интервале моменты сопротивления вращению барабана вызывают быстрое расхождение данной кинетической энергии. Для ее поддержания снижается частота вращения двигателя, что вызывает рост крутящего момента на коленчатом валу согласно внешней скоростной характеристике. Однако общая потребляемая мощность при этом падает, а следовательно, уменьшается и полезная выполненная работа, что приводит к резкому снижению функции ЭП.

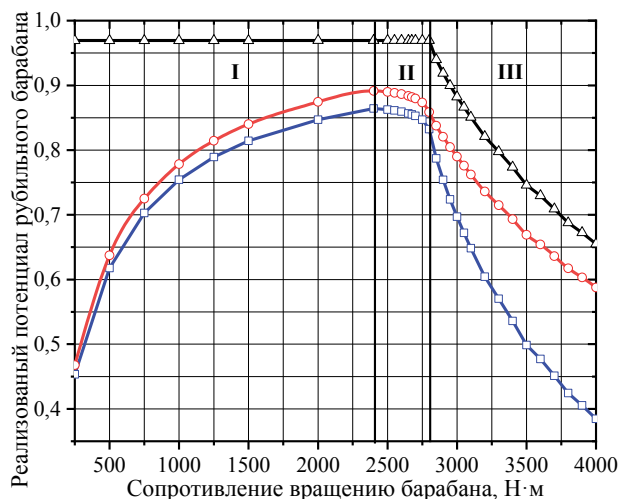


Рис. 1. Реализация потенциала рубильной машины на различных режимах работы при мощности питающего двигателя 238 кВт

Нагрузки свыше 2810 Н·м превышают максимальный крутящий момент на рубильном барабане. Это вызывает нелинейное падение крутящего момента на барабане и, как следствие, падение частоты его вращения до 500 об/мин. При большем снижении частоты вращения система управления «No stress» прекращает подачу древесного сырья транспортером, что способствует быстрому повторному разгону двигателя. Чем выше нагрузка, тем менее продолжительны периоды непрерывного рубления и тем большее количество непроизводительных «откатов» совершает подающий транспортер.

Период разгона барабана является «вредным» временем в технологическом цикле, так как полезная работа в это время не происходит. Кроме того, потребляемая энергия на разгон двигателя также является «вредной» (непроизводительной). Указанные факторы вызывают значительное снижение временного и энергетического КПД рубильной машины, быстрое убывание функции ЭП и в целом снижение эксплуатационной эффективности машины.

Энергетические параметры привода рубильной машины существенно влияют на ее эксплуатационную эффективность. Проследим изменение функции ЭП (рис. 2) для рассматриваемого рубильного модуля при различной питающей мощности привода (138 кВт, 238 кВт и 338 кВт).

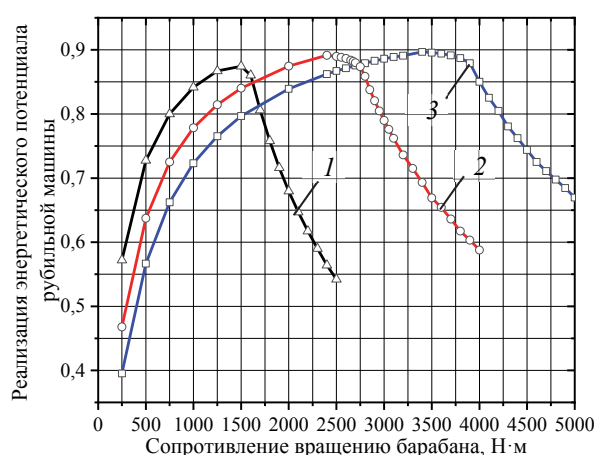


Рис 2. Реализация энергетического потенциала рубильной машины при мощности двигателя, питающего рубильный барабан: 1 – 138 кВт; 2 – 238 кВт; 3 – 338 кВт

По зависимостям ЭП (рис. 2) для постоянных условий эксплуатации однозначно определяются наиболее эффективный привод и номинальная мощность двигателя. Из рассмотренных на рис. 2 вариантов при моментах сопротивления вращению барабана до 1675 Н·м эффективнее использовать привод с двигателем номинальной мощностью 138 кВт. На интервале от 1675 Н·м до 2750 Н·м следует использовать привод с номинальной мощностью двигателя 238 кВт, а далее – 338 кВт.

В реальном лесопромышленном производстве условия эксплуатации характеризуются значительной неоднородностью. Поэтому корректнее проводить анализ не для константных, а для переменных параметров предмета труда. В общем случае переменность диаметров и длин стволовой фаутной древесины как предмета труда для рубильной машины подчинена некоторому закону распределения. К примеру, для получения щепы в условиях нижнего склада либо при работе исключительно после проведения определенного вида рубок силы сопротивления

будут распределены по нормальному закону. Для случая переработки фаутной, ветровальной или буреломной древесины, а также при частом изменении типа перерабатываемого сырья законы распределения сил сопротивления часто отличаются от нормального. Кроме того, для сучьев и ветвей дополнительным определяющим параметром является коэффициент их полндревесности. Однако он, как правило, постоянен. При вариабельности сил сопротивления вращению барабана за счет изменения диаметров стволовой древесины функция ЭП имеет вид

$$\text{ЭП} = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}} \frac{t_{\text{раб}}}{T_{\text{полн}}} C(d), \quad (2)$$

где d_{\max} – максимальный диаметр стволовой древесины, м; d_{\min} – минимальный диаметр стволовой древесины, м; $C(d)$ – парциальный коэффициент, учитывающий вероятность работы рубильного модуля со стволовой древесиной заданного диаметра.

В качестве парциальных коэффициентов $C(d)$, входящих в выражение (2), принимаются данные распределения диаметров по ступеням толщины [13–15].

Заключение. В статье рассмотрена методика оценки эффективности операции рубления древесины в различных условиях эксплуатации и при использовании приводов рубильного барабана различной номинальной мощности. Путем анализа установлено, что при повышении номинальной мощности привода область эффективного использования рубильной машины смещается в зону больших моментов сопротивления вращению барабана. Максимальная достигаемая эффективность процесса рубления также возрастает. К примеру, для мощности двигателя 138 кВт максимальная величина функции ЭП достигается при моменте сопротивления 1500 Н·м и составляет 0,87, для мощности 238 кВт – 2400 Н·м и 0,89, а для мощности 338 кВт – 3400 Н·м и 0,90 соответственно.

Установлено, что при использовании системы управления «No stress» значительно расширяется диапазон потенциального применения рубильной машины. Однако общая эффективность работы рубильного барабана на участке срабатывания системы «No stress» быстро падает. Характер кривых падения эффективности (функции ЭП) на участках срабатывания системы управления не зависит от номинальной мощности двигателя. При работе с тонкомерной древесиной большая эффективность достигается при использовании привода меньшей номинальной мощности, но не менее необходимой для работы барабана без срабатывания системы «No stress».

Дальнейшие исследования в области моделирования работы рубильной машины будут

направлены на изучение эффективности выполнения всей совокупности операций с учетом при- вода подачи сырья, работы манипулятора, вы-

броса щепы и т. д. Также будет определено влияние на эффективность работы машин объемов за- пасов сырья и наличия отказов.

Литература

1. Князев А. В., Бородин Н. А. Совершенствование конструкции рубильной машины с использо- ванием пильных дисков в качестве режущего рабочего органа для измельчения отходов лесопиления // *Актуальные направления научные исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 170–172.
2. Ледницкий А. В. Экономическая оценка эффективности производства круглых лесоматериалов и топливной щепы при разработке ветровально-буреломных лесосек // *Труды БГТУ*. 2015. № 7 (180): Экономика и управление. С. 177–181.
3. Германович А. О. Сменная производительность мобильных рубильных машин // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2015. Т. 3, № 4–1 (15–1). С. 283–286.
4. Германович А. О., Лой В. Н., Пищов С. Н. Анализ технологических процессов заготовки щепы мобильными рубильными машинами // *Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017 г.* Минск: БГТУ, 2017. С. 20–24.
5. Лой В. Н., Германович А. О. Анализ транспортной составляющей технологического цикла мобильной рубильной машины // *Труды БГТУ*. 2014. № 2 (166): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 24–27.
6. Коробкин В. А., Веркович Н. А. Рубильные машины ПО «МТЗ» для производства топливной щепы // *Строительные и дорожные машины*. 2008. № 11. С. 16–19.
7. Германович А. О. Тарирование тензорезистивных датчиков для определения крутящего момента привода рубильной установки // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2014. Т. 2, № 3–2 (8–2). С. 298–303.
8. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Математическое моделирование работы рубильной машины с учетом запаса сырья // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2017. Т. 5, № 8–1 (34–1). С. 187–191.
9. Голякевич С. А., Пищов С. Н. Информационные технологии в лесном комплексе. Минск: БГТУ, 2018. 123 с.
10. 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 г. № 2 (198). С. 238–244.
11. Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Мохов С. П. Методика оценки технических характеристик форвардеров на стадии проектирования // *Труды БГТУ*. 2016. № 2 (184): Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 15–19.
12. Голякевич С. А. Энергетические аспекты функционирования многооперационных лесозаготовительных машин // *Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 апреля 2017 г.* Минск: БГТУ, 2017. С. 64–68.
13. 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 г.* Могилев: ГУ ВПО «Белорус.-Рос. ун-т». С. 207–208.
14. Голякевич С. А. Имитационное моделирование технологического оборудования форвардера как мехатронной системы // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2019. № 2 (222). С. 174–180.
15. Голякевич С. А., Гороновский А. Р., Мохов С. П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MatLab / Simulink / Simscape // *Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2019. № 1 (216). С. 126–131.

References

1. Knyazev A. V., Borodin N. A. Chipper machine designs improvement using saw blades as cutting tool for milling sawmill waste. *Aktual'nyye 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. 170–172 (In Russian).
2. Lednitskiy A. V. Economic evaluation of the production efficiency of round timber and wood chips when working on windbreak areas. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 7 (180): Economics and management, pp. 177–181 (In Russian).
3. Germanovich A. O. Shift performance of mobile chipper machines. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2015, vol. 3. no. 4–1 (15–1), pp. 283–286 (In Russian).

4. Germanovich A. O., Loy V. N., Pishchov S. N. Analysis of technological processes of wood chips harvesting by mobile chipper machines. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problem i resheniya"* [Materials of International scientific and technical conference "Logging production: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 20–24 (In Russian).
5. Loy V. N., Germanovich A. O. Analysis of the transport component of the technological cycle of the mobile chipper machine. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no 2 (166): Forest and Woodworking Industry, pp. 24–27 (In Russian).
6. Korobkin V. A., Verkovich N. A Chipper machines by MTZ for wood chips production. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road cars], 2008, no. 11, pp. 16–19 (In Russian).
7. Germanovich A. O. Calibration of strain gauge sensors to determine the torque of the chipper drive. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2014, vol. 2, no. 3–2 (8–2), pp. 298–303 (In Russian).
8. Ignatenko V. V., Leonov Ye. A. Mathematical modeling of the chipper machine operation with taking into account the stock of raw materials. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2017, vol. 5, no. 8–1 (34–1), pp. 187–191 (In Russian).
9. Golyakevich, S. A., Pishchov S. N. *Informatsionnyye tekhnologii v lesnom komplekse* [Information technologies in the forest complex]. Minsk, BGTU Publ., 2018, 123 p.
10. Golyakevich S. A. Application of adaptive control systems to increase the realization of energy potential of harvesters. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2 (198): Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, pp. 238–244 (In Russian).
11. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R., Mokhov S. P. Methodology for assessing technical characteristics of forwarders at the design stage. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2 (184): Forest and Woodworking Industry, pp. 15–19 (In Russian).
12. Golyakevich S. A. Energy aspects of multioperational forest machines functioning. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Lesozagotovitel'noye proizvodstvo: problemy i resheniya"* [Materials of International scientific and technical conference "Logging production: problems and solutions"]. Minsk, 2017, pp. 64–68 (In Russian).
13. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R. Fuel economy aspects of multioperational forest machines. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Materialy, oborudovaniye i resursosberegayushshiye tekhnologii"* [Materials of the International scientific and technical conference "Materials, equipment and resource-saving technologies"]. Mogilev, 2017, pp. 207–208 (In Russian).
14. Golyakevich S. A. Simulation modeling of technological equipment of a forwarder as mechatronic system. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2 (198): Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, pp. 174–180 (In Russian).
15. Golyakevich S. A., Goronovskiy A. R., Mokhov S. P. Results of simulation modeling of the hydraulic system of forwarder in MatLab / Simulink / Simscape. *Trydy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2 (198): Forestry, Nature Management and Renewable Resources Processing, pp. 126–131 (In Russian).

Информация об авторе

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

Гороновский Андрей Романович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства, проректор по воспитательной работе. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: arg@belstu.by

Information about the author

Golyakevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Engineering), Associate 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

Goronovskiy Andrey Romanovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology, Vice-Rector for Logging Machinery. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: arg@belstu.by

Поступила 27.09.2019