

Постановка задачи поиска оптимальных параметров конструкции установки для групповой раскряжевки пачек порубочных остатков

П.Б. Рябухин^{1a}, И.В. Григорьев^{2b}, П.В. Трушевский^{3c}, П.А. Курочкин^{4d},
М.К. Охлопкова^{5e}, А.Ю. Жук^{6f}

¹ Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

² Арктический государственный агротехнологический университет,
Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

³ ООО «Сибирский биоуголь», ул. Глаголева, 3, Калуга, Россия

⁴ Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа, ул. Профсоюзная, 65, Москва, Россия

⁵ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
ул. Белинского, 58, Якутск, Республика Саха (Якутия)

⁶ Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a PRyabukhin@mail.khstu.ru, ^b silver73@inbox.ru, ^c p.trushevskii@coal.bio, ^d pavel.a.kurochkin@yandex.ru,

^e omk1268@mail.ru, ^f ftslk@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^c <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>,

^d <https://orcid.org/0009-0006-8900-1975>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6813-7009>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 15.01.2024, принята 08.02.2024

В Российской Федерации, как и в большей части стран мира, доминирует сортиментная группа технологических процессов заготовки древесины, предусматривающая вывозку с лесосек бревен специального назначения — сортиментов. Наибольшее распространение получила скандинавская технология, реализуемая при помощи двухмашинных комплексов, включающих харвестер и форвардер. Больше всего порубочных остатков на пачках, при прочих равных условиях, остается именно при реализации скандинавской технологии лесосечных работ. Часть из них оказывается вдавлена в почвогрунт на трассах трелевочных волоков, часть оказывается измельченной. Но, как показывает практика обследования вырубок в различных субъектах Сибири и Дальнего Востока, достаточно большая доля порубочных остатков технически доступна и может быть собрана для дальнейшего использования. Статья посвящена вопросу решения задачи оптимального проектирования параметров конструкции установки для раскряжевки пачек порубочных остатков. В результате анализа работы промышленных и экспериментальных установок данного типа определены основные конструктивные и кинематические параметры, в значительной степени оказывающие влияние на эффективность ее функционирования, установлены диапазоны их численных значений. Сформулирована формализованная постановка задачи статической оптимизации процесса. Представлены предварительные теоретические исследования, которые составят основу дальнейших изысканий по составлению алгоритма решения задачи параметрического синтеза элементов конструкции установки для пачковой раскряжевки, математического описания и вычисления численных значений исследуемых параметров элементов конструкции установки путем реализации данного алгоритма в виде программного продукта.

Ключевые слова: лесозаготовки; порубочные остатки; очистка лесосек; пачковая раскряжевка; гибкая пильная цепь; оптимизация.

Formulation of the problem of finding optimal parameters of the installation design for group bucking of felling residues bundles

P.B. Ryabukhin^{1a}, I.V. Grigoriev^{2b}, P.V. Trushevsky^{3c}, P.A. Kurochkin^{4d},
M.K. Okhlopkova^{5e}, A.Yu. Zhuk^{6f}

¹ Pacific State University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

² Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Sergelyakhskoye Shosse, Bld. 3, Yakutsk, Republic of Sakha

³ Siberian Biougol LLC; 3, Glagolev St., Kaluga, Russia

⁴ Scientific Research and Design Institute for Gas Processing; 65, Trade Profsoyuznaya St., Bld., Moscow, Russia

⁵ North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov; 58 Belinsky St., Yakutsk, Republic of Sakha

⁶ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a PRyabukhin@mail.khstu.ru, ^b silver73@inbox.ru, ^c p.trushevskii@coal.bio, ^d pavel.a.kurochkin@yandex.ru,

^e omk1268@mail.ru, ^f ftslk@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-1735-1942>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^c <https://orcid.org/0009-0000-5639-5492>,

^d <https://orcid.org/0009-0006-8900-1975>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-6813-7009>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Received 15.01.2024, accepted 08.02.2024

In the Russian Federation, as in most of the countries of the world, the sorting group of technological processes for wood preparation dominates, providing for the removal of special-purpose logs (sortings) from logging sites. The Scandinavian technology, implemented with the help of two-machine complexes, including a harvester and a forwarder, has received the greatest distribution. All other conditions being equal, the majority of logging residues remain in apiaries when the Scandinavian logging technology is implemented. Some of them are pressed into the soil on the tracks of the skidding lines, some are crushed. But, as the practice of surveying deforestation in various regions of Siberia and the Far East shows, a fairly large proportion of felling residues is technically available and can be collected for further use. The article is devoted to solving the problem of optimal design of the parameters of the installation design for bucking bundles of felling residues. As a result of the analysis of the work of industrial and experimental installations of this type, the main structural and kinematic parameters that significantly affect the efficiency of its operation are determined, and ranges of their numerical values are established. A formalized formulation of the problem of static optimization of the process is given. Preliminary theoretical studies are presented, which form the basis for further research on the compilation of an algorithm for solving the problem of parametric synthesis of structural elements of a pack bucking installation, a mathematical description and calculation of numerical values of the studied parameters of the structural elements of the installation by implementing this algorithm in the form of a software product.

Keywords: logging; felling residues; clearing of cutting areas; pack bucking; flexible saw chain; optimization.

Введение. В Российской Федерации, как и в большей части стран мира, доминирует сортиментная группа технологических процессов заготовки древесины, предусматривающая вывозку с лесосек бревен специального назначения — сортиментов. При использовании технологических процессов данной группы сортименты могут производиться на пасеке (скандинавская технология) или на верхнем складе. При работе по скандинавской технологии на пасеке производят валку деревьев, очистку от сучьев и раскряжевку, после чего полученные сортименты трелюют в полностью погруженном положении на погрузочный пункт. При производстве сортиментов на верхнем складе возможны два варианта: во-первых, валка деревьев и их очистка от сучьев на пасеках с последующей трелевкой хлыстов и их раскряжевкой на верхнем складе; во-вторых, валка деревьев и их трелевка на верхний склад с последующей обработкой (обрезка сучьев и раскряжевка) процессором (канадская технология). В России наибольшее распространение получила скандинавская технология, реализуемая при помощи двухмашинных комплексов, включающих харвестер и форвардер. Больше всего порубочных остатков на пасеках, при прочих равных условиях, остается именно при реализации скандинавской технологии лесосечных работ. Часть из них оказывается вдавлена в почвогрунт на трассах трелевочных волоков, часть оказывается измельченной. Но, как показывает практика обследования вырубок в различных субъектах Сибири и Дальнего Востока, достаточно большая доля порубочных остатков технически доступна и может быть собрана для дальнейшего использования [1–4].

Многие годы в СССР, а затем в Российской Федерации самым популярным вариантом очистки лесосек от порубочных остатков было укладывание их в трелевочные волока с последующим примятием трактором. Такой вариант часто называли параллельной очисткой, поскольку она проводилась одновременно с валкой деревьев и их очисткой от сучьев. Правда, на практике некоторые лесозаготовители делали укладку порубочных остатков на трелевочные волоки уже после окончания основных работ и движителями трактора их не приминали. Обычно это приводило к наложению штрафа от лесхоза (лесничества). После появления в

нормативной документации (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 367 от 27.06.2016 г. «Об утверждении Видов лесосечных работ, порядка и последовательности их проведения, Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки») пункта «укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки» зачастую порубочные остатки стали просто бросать на месте образования [5–7]. Это хорошо видно на фото (рис. 1), сделанном на вырубке в Чунском лесничестве Иркутской области (Выдринское участковое лесничество, Ковинская дача) после сплошной рубки спелых и перестойных насаждений сосны машинным комплексом харвестер + форвардер с оставлением семенных деревьев. Данное фото хорошо иллюстрирует, как при хороших почвенно-грунтовых условиях, когда нет необходимости в укреплении трелевочных волоков порубочными остатками, вырубка может быть полностью покрыта ковром порубочных остатков, часть из которых достаточно крупные.

Причем оставление вершинных частей ствола диаметром до 16 см на вырубке характерно для многих лесопромышленных субъектов РФ в Сибири и на Дальнем Востоке. В этих субъектах крайне неразвита глубокая переработка древесины, а предприятия, специализирующиеся на выпуске продукции глубокой переработки древесины — ЦБК, плитные заводы, заводы по производству пеллет и т. д., как раз и являются основными потребителями балансовой древесины, получаемой из вершинных сортиментов [8–10].

На некоторых вырубках можно видеть, как невосребованные вершинные сортименты оставляются лесозаготовителями на верхнем складе или на погрузочном пункте. В последнем случае из них формируют отдельный штабель при разгрузке-сортировке стрелованных бревен форвардером [11] (рис. 2). В дальнейшем деловая по качеству, но низкотоварная по экономическим свойствам древесина из этого штабеля или сжигается в пожаробезопасный период, или остается на перегнивание, значительно реже закапывается или вывозится на строительство лежневых участков лесовозных дорог.



Рис. 1. Вырубка в Иркутской области



Рис. 2. Штабель верхних обрезков на погрузочном пункте в Республике Саха (Якутия)

Но при скандинавской технологии заготовки древесины, в отличие от канадской технологии, концентрация крупных порубочных остатков в штабеле — редкость. Поскольку, если вывозить их в дальнейшем не планируется, то их сбор и трелевка при современных, очень либеральных требованиях к очистке лесосек является для лесозаготовителей лишней тратой времени и горючего. На большей части изученных вырубок крупные порубочные остатки и часть кроны оставляются вперемешку [12] (рис. 3).



Рис. 3. Вырубка, покрытая вперемешку крупными (стволовыми) порубочными остатками и частями кроны (Красноярский край)

Сбор порубочных остатков на лесосеке является хотя и сложным, но вполне решаемым вопросом [2]. За рубежом разработаны специальные лесные машины-подборщики, которые собирают порубочные остатки и при помощи установленного на них пакетирующего модуля увязывают порубочные остатки в пакеты с одновременной их раскряжевкой на одинаковые размеры [13] (рис. 4). Затем полученные пакеты порубочных остатков собирают и доставляют на погрузочный пункт обычным форвардером. После чего эти снопы могут быть вывезены автолесовозом к месту их дальнейшего использования (обычно в энергетических целях) [14]. В условиях Сибири и Дальнего Востока такие пакеты могут использоваться для укрепления отдельных участков лесных дорог (как фашины) или на лесных терминалах для получения тепловой и электрической энергии в газогенераторных установках [15–20].

Раскряжевка в пакетирующих модулях производится при помощи цепных пильных гарнитур. Но данные модули предназначены для сбора и пакетирования кроновой части, а не круглых лесоматериалов (верши, откомлевок) с диаметрами более 10 см, поскольку в практике иностранных лесозаготовителей нет оставления столь крупных порубочных остатков.

В этой связи формулируется задача обоснования оптимальных параметров установки для групповой раскряжевки пакетов (пачек) порубочных остатков, включающих круглые лесоматериалы диаметром 10 см и более.



Рис. 4. Пакетирующий модуль *Fiberpac* на базе *John Deere 1490D*

Материалы и методы исследования. Использованы анализ литературных источников, методы математического моделирования и оптимизации.

Результаты исследования. Большое внимание решению поставленного в статье вопроса было уделено в начале XXI в. в США. Компания «Карри Кост Катер» разработала и выпустила в производство несколько моделей установок для пачковой раскряжевки с П-образной конструкцией каркаса подающего механизма, на которой в качестве рабочего режущего элемента была применена универсальная пильная цепь Г-образного типа. В Канаде в настоящее время производятся и эксплуатируются подобные раскряжевные установки для пачковой раскряжевки балансового долготья.

Спроектированные в ЦНИИМЭ и созданные в СССР [21] конструкции установок ЛС-67 и ЛО-62М показали высокие результаты по производительности, но в них не решена проблема зажима пильной цепи в

пропиле пачки, что сокращает сроки службы пильной цепи и увеличивает время на наладку оборудования после устранения последствий зажима и приводит к дополнительным простоям установки.

Как показали отчеты лесопромышленного предприятия «Архангельская лесная биржа», где проводилось промышленное внедрение установки ЛО-62М, потери производительности за рабочую смену от зажимов пильной шины в пропилах составили до 30 %. Решение проблемы беззажимной работы пильной цепи при помощи дополнительных приспособлений не привело к желаемому результату.

Анализ научно-исследовательских работ и отчетно-производственных документов убедил авторов в необходимости разработки раскряжевочной установки для пачковой раскряжевке с использованием режущего инструмента беззажимного типа, поскольку из всех анализируемых механических режущих устройств ни один в полной мере не удовлетворяет условиям беззажимного пиления.

Сравнительная оценка различных режущих органов для поперечной распиловки по конструктивным, технологическим и эксплуатационным показателям выявила, что наилучший оценочный показатель имеет гибкая пильная цепь (ГПЦ), представляющая собой гибкую нить (стальной канат) с закрепленными на ней чашечными кольцеобразными резами с определенным шагом (рис. 5).

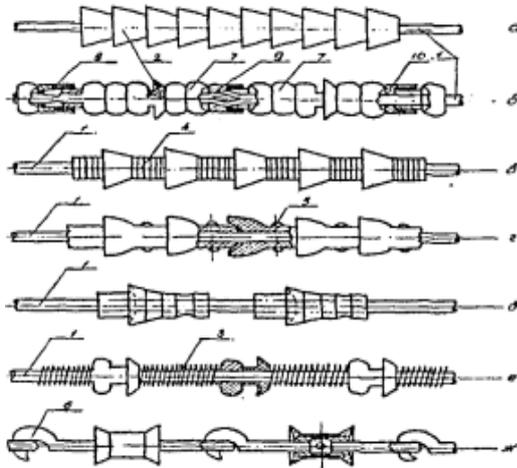


Рис. 5. Основные типы гибких пильных цепей: *a, в* — гибкие пилы, применяемые в камнерезной промышленности; *г, д* — гибкие пилы, применяемые в лесной промышленности США; *б, е, ж* — отечественные пилы для лесной отрасли. 1 — канат; 2 — резец; 3 — пружина; 4 — эластичная муфта; 5 — заклепка; 6 — крюк; 7 — шайба; 8 — кулачковый патрон; 9 — соединительная муфта; 10 — компенсационная муфта

В работе [22] рассмотрены вопросы эффективности использования системы гибкой нити для различных условий эксплуатации. Лабораторные исследования показали, что ГПЦ беззажимна. Это свойство обеспечено тем, что она не имеет пассивных частей в виде полотна пильной шины и элементов реза, выходящих за пределы кольцевой режущей кромки. Вследствие беззажимности нет необходимости устанавливать на раскряжевочном оборудовании дополнительные и дорогостоящие приспособления, предназначенные для

устранения зажимов. Работа ГПЦ без пильной шины не только упрощает и удешевляет конструкцию пильного аппарата установки, но и (вследствие отсутствия трения пильной цепи о шину) дает возможность увеличения скорости резания (скорости движения режущего инструмента в пропилах) до 30–50 м/с. Работа пильного аппарата на повышенной скорости позволяет повысить качество торцов распиливаемой поверхности, снизить износ режущих элементов пильного инструмента и повысить производительность установки.

Задачу оптимального проектирования параметров конструкции раскряжевочной установки можно решить по двум известным направлениям теории оптимизации [23]:

1. Задачи параметрической оптимизации, предполагающие набор конечного числа параметров в системе (устройстве, машине, аппарате) при уже заранее заданной ее структуре;

2. Задачи вариационного исчисления, предполагающие отсутствие структуры системы и необходимость ее создания (синтезирования).

Стоящая в данном исследовании задача относится к первому классу задач. В рамках ее решения необходимо предполагаемую цель и существующие связи между переменными факторами процесса выразить в виде математических зависимостей.

Раскряжевочную установку и объект обработки (пачку порубочных остатков) можно представить как определенную структуру, имеющую некоторое количество входов и выходов. Тогда формализованная постановка задачи статической оптимизации процесса будет заключаться в следующем: комплекс показателей, отражающих условия функционирования исследуемой структуры, могут быть выражены как сочетание векторов Z, X, Y [23–25].

Z — вектор входящих показателей:

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k).$$

К входящим показателям структуры могут относиться качественно-геометрические характеристики распиливаемых порубочных остатков, техническое состояние оборудования и др.

X — вектор эксплуатационных показателей:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Y — вектор выходных показателей:

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m).$$

Элементами вектора Y могут быть геометрические параметры пакетов и другие показатели, определяющие конструктивные и эксплуатационные параметры анализируемой структуры. Рассматриваемые параметры должны располагаться в диапазоне, который устанавливается в виде следующих ограничивающих условий режима технологического процесса:

$$\begin{aligned} Z_k \min &\leq Z_k \leq Z_k \max; & k &= 1, 2, \dots, p, \\ X_j \min &\leq X_j \leq X_j \max; & j &= 1, 2, \dots, t, \\ Y_i \min &\leq Y_i \leq Y_i \max; & i &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (1)$$

В рамках проведения оптимизации ставится задача определить такие величины входящих и эксплуатационных показателей исследуемой структуры из всего множества допустимых значений анализируемых параметров,

которые бы позволили показателю оптимальности процесса достигнуть предельного уровня [24; 25].

Тогда описание процесса может быть выражено в виде математической модели:

$$Y_i = f_i(Z, X), \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

или в другой форме:

$$Y = F(Z, X).$$

Максимальный эффект в эксплуатации объекта исследования можем оценить некоторым комплексным критерием оптимизации M :

$$M = R(Z, X, Y),$$

где $R(Z, X, Y)$ — оптимизируемый комплексный критерий исследуемой структуры.

Принимая во внимание систему ограничений (1), в качестве комплексного критерия структуры допустимо предположить лишь вектор входящих показателей Z и вектор эксплуатационных показателей X .

Отсюда следует, что:

$$R(Z, X, Y) = R[Z, X, F(Z, X)] = F(Z, X). \quad (2)$$

На основании вышеизложенных заключений задачу оптимизации параметров исследуемого объекта [26] можно формулировать в следующем виде: по заданным значениям $[Z_k] = [Z_k^*]$ в рамках диапазона ограничений (1) нужно установить все значения эксплуатационных показателей $X_j = X_{j\text{opt}}$, обеспечивающие выполнение заданного условия:

$$Y_{i\text{min}} \leq Y_i \leq f_i(Z^*, X) \leq Y_{i\text{max}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Тогда комплексный критерий оптимизации M будет стремиться к своим экстремальным значениям:

$$M = F(Z^*, X) \rightarrow \text{extr.}, \quad (4)$$

где Z^* — фактическое значение вектора входящих показателей.

Ограничительные диапазоны значений оптимизируемого комплексного критерия исследуемой структуры представлены в математическом виде (1) и (3), с помощью которых устанавливаются определенные требования к входящим показателям объекта оптимизации и его управляющим воздействиям.

Решение задачи оптимизации требуется в случае, если в системе одновременно проявляются взаимно противоречивые ограничительные входные параметры (условия), и необходимость поиска оптимальности заключается в максимальном удовлетворении этих условий. Таким образом, задача оптимизации заключается в выборе такой модели объекта исследований, при которой принятый критерий оптимальности достигает своего экстремального значения. В качестве критерия оптимальности могут приниматься экономические, технологические, конструктивные и другие показатели качества, например, показатели эргономичности и безопасности персонала, экологической безопасности, которые дают возможность дать количественную оценку прохождению процесса в исследуемом объекте [27; 28].

При выборе эксплуатационных параметров технологического оборудования учтены как требования к проектированию оборудования, так и требования его эксплуатации, которые отражают следующие условия: качество продукции; конструкторско-технологически

возможный диапазон входных параметров; производительность объекта исследований; соответствие конструктивных и параметрических параметров технологическим условиям эксплуатации объекта исследований.

Все параметры любого механизма, выполняющего технологические операции, можно разделить на два вида [26] — конструктивные параметры: x_1, x_2, x_3 ; кинематические параметры: x_4, x_5 .

В рамках проведения аналитических исследований по влиянию энергетических, экономических и конструктивных показателей на процесс обработки круглых лесоматериалов с помощью установки для пачковой раскряжки с гибким режущим инструментом с резами кольцевой формы установлены основные параметры (показатели), определяющие эффективность ее функционирования:

– *конструктивные (конструкционные)*: ширина пачки, B ; диаметр резцов режущего органа, d_r ; шаг резцов, t_p ;

– *кинематические (технологические)*: скорость резания, V_p ; скорость подачи, U .

На рис. 6 представлена схема установки и обозначены основные ее параметры, которые необходимо синтезировать.

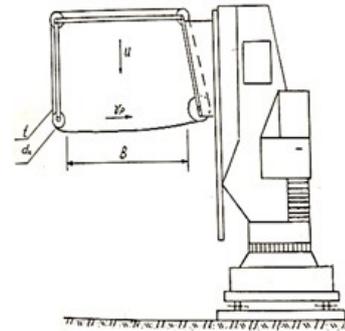


Рис. 6. Схема установки для групповой раскряжки

Степень влияния выбранных параметров на эффективность работы объекта исследований неоднозначна, в связи с чем поставленную задачу оптимизации необходимо решать с использованием интегративного подхода. Процесс поиска оптимальных параметров исследуемого объекта полностью определяется разработчиком в виде установленного алгоритма, начальным состоянием системы и значениями входных переменных. Поэтому задача оптимизации, сформулированная таким образом, относится к детерминированной. Способ решения поставленной задачи может быть определен однозначно в виде последовательности шагов и реализован различными методами математического программирования [29; 30].

Решение вопроса оптимизации в данном случае реализуется с учетом вводимого лимитирования диапазонов конструкционных и технологических показателей:

$$X_{1-5}^{\text{min}} \leq X_{1-5} \leq X_{1-5}^{\text{max}}. \quad (5)$$

Тогда постановка задачи оптимального проектирования исследуемого объекта сводится к решению задачи нелинейного программирования.

С учетом вышеизложенных доводов задача оптимального проектирования исследуемых параметров установки,

эксплуатируемой в диапазоне ограниченных конструктивных и технологических показателей, сводится к следующему: в результате проведения оптимизационных расчетов следует выбрать такие показатели $x_1 \div x_5$, которые обеспечат максимальную производительность чистого пиления $P_{ч.п.}$ режущего органа пильного аппарата при минимальной его металлоемкости (металлопотребности) $g^{p.o}$, минимальном потреблении мощности N_p и с максимальной надежностью [31].

Для упрощения структуры математической модели параметры производительности чистого пиления $P_{ч.п.}$ и потребной мощности N_p , которые в первую очередь влияют на процесс резания, сведем в один общий показатель, характеризующий затраты энергии при срезании древесной стружки.

В этом случае задача поиска оптимальных значений параметров (показателей) исследуемого объекта в математическом виде может быть определена так: для решения поставленной цели необходимо установить составляющие звенья гипервектора X_y^* , способные обеспечить одновременно минимальное значение оптимизируемого комплексного критерия исследуемой структуры в рамках диапазона ограничений (5):

$$t. e. \min \frac{N_p(X_j)}{P_{ч.п.}(X_j)} \forall \min Dup(X_j) \forall \min g^{p.o}(X_j), \quad (6)$$

где $N_p(X_j)$ — мощность, необходимая для реализации процесса резания; $P_{ч.п.}(X_j)$ — производительность чистого пиления; $D_{up}(X_j)$ — дисперсия квантилей (квантильное отклонение) вероятности устойчивой и безотказной эксплуатации пильного аппарата установки; $g^{p.o}(X_j)$ — металлопотребность на создание гибкой пильной цепи.

Поиск наиболее выгодных (оптимальных) параметров X_y^* базируется на создании некоторой «зоны уступок» M , в совокупности по $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n) \in B$.

В качестве B обозначено множество векторов $\varphi^* = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ в диапазоне $0 \leq \varphi_i \leq 1$ ($i=1, \dots, n$), $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n = 1$.

$$\varphi_1 \frac{N_p(x_i^{-\alpha})}{P_{ч.п.}(x_i^{-\alpha})} + \varphi_2 D_{up}(x_i^{-\alpha}) + \varphi_3 g^{p.o}(x_i^{-\alpha}) \varphi = \min[\varphi_1 \cdot R(x_i) + \varphi_3 g^{p.o} x_i].$$

Исходя из этого, комплексный консенсусный параметр продуктивности объекта в виде раскряжевочной установки можно сформулировать как оптимизируемый комплексный критерий исследуемой структуры в следующем виде:

$$M = \varphi_1 \left(\frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \right) + \varphi_2 \left(\frac{D_{up} - \overline{D_{up}}}{\overline{D_{up}}} \right) + \varphi_3 \left(\frac{g^{p.o} - \overline{g^{p.o}}}{\overline{g^{p.o}}} \right), \quad (7)$$

где \bar{R} ; $\overline{D_{up}}$; $\overline{g^{p.o}}$ — частные экстремальные значения комплексного критерия, определенные с учетом того, что влияние остальных критериев незначительно; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — весовые показатели (коэффициенты значимости) при исследуемых параметрах [26].

После получения математических моделей отдельных параметров исследуемого объекта задачу его моделирования можно сформулировать так: необходимо определить показатели X_y^* объекта, позволяющие получить минимальные значения анализируемых частных значений (затраты на выполнение работы по резанию

древесины, квантильное отклонение вероятности надежности эксплуатации установки и металлопотребности гибкой пильной цепи) с учетом вводимого лимитированного диапазона их значений.

Таким образом, оптимизируемый комплексный критерий исследуемой структуры (7) можно записать как:

$$\min M = \min \left[\varphi_1 \frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} + \varphi_2 \frac{D_{up} - \overline{D_{up}}}{\overline{D_{up}}} + \varphi_3 \frac{g^{p.o} - \overline{g^{p.o}}}{\overline{g^{p.o}}} \right]. \quad (8)$$

Показатели, которые обеспечивают минимум M , будут соответствовать консенсусным величинам, отвечающим всем трем исследуемым параметрам ($\min R$; $\min D_{up}$; $\min g^{p.o}$) одновременно. Вследствие этого, по существу, задача поиска оптимальных значений исследуемых параметров объекта типизирована в задачу нелинейного программирования [32]:

$$\min M = \min \left[l_1 \frac{\bar{R} - R}{\bar{R}} + l_2 \frac{D_{up} - \overline{D_{up}}}{\overline{D_{up}}} + l_3 \frac{g^{p.o} - \overline{g^{p.o}}}{\overline{g^{p.o}}} \right], \quad (9)$$

Лимитированный диапазон значений исследуемых параметров принят с учетом их реальной целесообразности применительно к технологии процесса раскряжевки пачек порубочных остатков и конструкции отдельных узлов установки:

$$\begin{cases} 1,5 \leq B \leq 3,0, \text{ м;} \\ 0,01 \leq d_n \leq 0,03, \text{ м;} \\ 0,02 \leq t \leq 0,20, \text{ м;} \end{cases} \left\| \begin{cases} 5,00 \leq U_p \leq 30,00, \text{ м/с;} \\ 0,005 \leq U \leq 0,05, \text{ м/с.} \end{cases} \right.$$

Выводы

1. Комплекс факторов, определяющих эффективность технологического процесса работы раскряжевочной установки с учетом объекта обработки в виде пакетов порубочных остатков, можно представить как определенную структуру, имеющую некоторое количество входов и выходов.

2. Сформулирована формализованная постановка задачи статической оптимизации процесса, которая будет заключаться в следующем: все параметры, отражающие состояние исследуемого объекта, можно представить в виде совокупности векторов входных, эксплуатационных и выходных параметров. Рассматриваемые параметры должны располагаться в интервале, установленном режимом технологического процесса, задающегося в виде некоторых объективных ограничений (лимитированного диапазона их значений).

3. Задача оптимизации, сформулированная таким образом, относится к детерминированной, поскольку процесс поиска оптимальных параметров исследуемого объекта полностью определяется разработчиком в виде установленного алгоритма, начальным состоянием системы и значениями входных переменных.

4. Способ решения поставленной задачи может быть определен в виде последовательности шагов и реализован одним из существующих методов математического программирования.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/. <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Литература

- Герц Э.Ф., Куницкая О.А., Макуев В.А., Дмитриев А.С., Тихонов Е.А., Григорьева О.И. Средоадаптивные технологии разработки лесосек в условиях Свердловской области // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2023. № 1. С. 52-63.
- Григорьева О.И. Новая машина для очистки лесосек // *Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика*. 2014. Т. 2, № 5-3 (10-3). С. 96-99.
- Григорьева О.И., Богачев П.В., Панарин А.О. Оценка структуры лесного фонда для проведения рубок прореживания и проходных рубок при переходе на нормативы интенсивной модели лесного хозяйства // *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всерос. науч.-технической конф. (25-27 мая 2022 г.)*. СПб., 2022. С. 125-126.
- Калишов В.А., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Современные технологии и системы машин для заготовки древесины на склонах // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов, с междунар. участием (31 янв. - 12 февр. 2022 г.)*. Минск, 2022. С. 46-49.
- Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высш. учеб. заведений, 2019. 192 с.
- Богданов А.С., Куницкая О.А. Динамика статистик производственного травматизма в лесном хозяйстве // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2023. № 1. С. 32-36.
- Трушевский П.В., Должиков И.С., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Правила техники безопасности при очистке лесосек от порубочных остатков // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2023. № 4. С. 10-29.
- Куницкая О.А., Пудова Т.М., Никитина Е.И. Перспективные направления переработки низкотоварной древесины и древесных отходов в Республике Саха (Якутия) // *Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства: сб. тр. конф. (20 марта 2019 г.)*. Якутск, 2019. С. 14-18.
- Куницкая О.А. Перспективные технологии переработки низкотоварной древесины // *Актуальные направления науч. исследований XXI века: теория и практика*. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 173-177.
- Григорьев В.Ф., Фокинов А.М., Шадрин И.И., Куницкая О.А. Экономические аспекты эффективного использования низкотоварной древесины // *Актуальные аспекты управления и экономики в современных условиях: сб. материалов IX Всерос. молодежного науч. форума (25 сент. - 20 окт. 2017 г.)*. Брянск, 2017. С. 160-163.
- Беляев Н.Л., Куницкая О.А. Аспекты охраны труда и промышленной безопасности при измерении круглых лесоматериалов: сравнение традиционных и дистанционных методов // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2023. № 2. С. 53-60.
- Куницкая О.А. Ресурсы низкотоварной древесины в субъектах Российской Федерации // *Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы республ. науч.-практической конф. (29 янв. 2015 г.)*. Петрозаводск, 2015. С. 15-17.
- Сюнев В.С., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет. Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. 143 с.
- Куницкая О.А., Давтян А.Б., Помигуев А.В. Транспортно-технологические комплексы для производства топливной щепы // *Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (15 апр. 2021 г.)*. Тюмень, 2021. С. 141-144.
- Kunickaya O., Pomiguyev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals // *Central European Forestry Journal*. 2022. V. 68, № 1. P. 51-59.
- Куницкая О.А., Помигуев А.В., Калита Е.Г., Швецова В.В., Тихонов Е.А. Анализ газогенерирующих систем для автономного энергоснабжения лесных терминалов // *Resources and Technology*. 2021. V. 18, № 3. P. 53-76.
- Куницкая О.А., Помигуев А.В., Бурмистрова Д.Д., Отмахов Д.В., Тихонов Е.А., Дмитриева И.Н. Электрохимические энергоустановки для обслуживания лесных терминалов // *Деревообрабатывающая пром-сть*. 2021. № 2. С. 36-46.
- Куницкая О.А., Стородубцева Т.Н., Помигуев А.В. Энергоресурсосберегающие технологии электроснабжения лесных терминалов // *Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: материалы Всерос. науч.-технической конф. (19-20 окт. 2021 г.)*. Воронеж, 2021. С. 112-117.
- Куницкая О.А., Помигуев А.В. Эффективная система преобразования тепловой энергии в электрическую для энергоснабжения лесных терминалов // *Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (25 мая 2021 г.)*. Петрозаводск, 2021. С. 104-105.
- Куницкая О.А., Помигуев А.В. Функциональные возможности и эксплуатационные характеристики средств энергоснабжения лесных терминалов // *Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Седьмой Всерос. нац. науч.-практической конф. с междунар. участием (25 мая 2021 г.)*. Петрозаводск, 2021. С. 102-103.
- Фергин В.Р. Методы оптимизации в лесопильно-деревообрабатывающем производстве. М.: Лесная пром-сть, 2005. 215 с.
- David J. Bents. Axial Force and Efficiency Tests of Fixed Center Variable Speed Belt Drive // *SAE Transactions*. 1981. № 810103. P. 438-450.
- Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. М.: Наука, 1989. 88 с.
- Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1995. 534 с.
- Пижурин А.А. Оптимизация технологических процессов деревообработки. М.: Лесная пром-сть, 1995. 312 с.
- Пижурин А.А. Современные методы исследований технологических процессов в деревообработке. М.: Лесная пром-сть, 1992. 247 с.
- Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. М.: Радио, 1995. 216 с.
- Серяков С.А., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Безопасность и охрана труда при эксплуатации и обслуживании импульсных харвестерных головок // *Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах*. 2023. № 3. С. 27-37.
- Фомин Я.А. Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1989. 264 с.
- Адаменко Г.М., Козябо Л.А. Вычисление безусловного минимума функции многих переменных гибридным алгоритмом. Минск: Программное обеспечение ЭВМ, 2014. Вып. 34. С. 40-44.
- Егоров В.И. Прогнозирование надежности и долговечности лесозаготовительного оборудования. М.: Лесная пром-сть, 2002. 128 с.
- Рябухин П.Б., Казаков Н.В., Луценко Е.В. Алгоритм решения задачи, по комплексной оценке, технологических процессов лесопромышленных предприятий // *Вестн. КрасГАУ*. 2018. № 1. С. 26-33.

Referents

1. Gerc E.F., Kunickaya O.A., Makuev V.A., Dmitriev A.S., Tihonov E.A., Grigor'eva O.I. Environment-saving technologies for the development of cutting areas in the Sverdlovsk region // *Derevoobrabatival'naya promishlennost'* (Woodworking industry). 2023. № 1. P. 52-63.
2. Grigor'eva O.I. A new machine for clearing cutting areas // *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2014. V. 2. № 5-3 (10-3). P. 96-99.
3. Grigor'eva O.I., Bogachev P.V., Panarin A.O. Assessment of the structure of the forest fund for thinning and logging during the transition to the standards of the intensive forestry model // *Lesnaya Rossiya: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy VII Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. (25-27 maya 2022 g.)*. SPb., 2022. P. 125-126.
4. Kalyashov V.A., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Modern technologies and systems of machines for harvesting wood on slopes // *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof.-prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov, s mezhdunar. uchastiem (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.)*. Minsk, 2022. P. 46-49.
5. Kunickaya O.A., Chernuckij N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. Machine harvesting of wood using Scandinavian technology. SPb.: *Izdatel'sko-poligraficheskaya asociaciya vyssh. ucheb. zavedenij*, 2019. 192 p.
6. Bogdanov A.S., Kunickaya O.A. Dynamics of statistics of industrial injuries in forestry // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2023. № 1. P. 32-36.
7. Trushevskij P.V., Dolzhikov I.S., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. Safety rules for clearing cutting areas of felling residues // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2023. № 4. P. 10-29.
8. Kunickaya O.A., Pudova T.M., Nikitina E.I. Promising areas of processing low-grade wood and wood waste in the Republic of Sakha (Yakutia) // *Potencial nauki i obrazovaniya: sovremennye issledovaniya v oblasti agronomii, zemleustrojstva, lesnogo hozyajstva: sb. tr. konf. (20 marta 2019 g.)*. YAKUTSK, 2019. P. 14-18.
9. Kunickaya O.A. Promising technologies for processing low-grade wood // *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2018. V. 6, № 4 (40). P. 173-177.
10. Grigor'ev V.F., Fokinov A.M., SHadrin I.I., Kunickaya O.A. Economic aspects of effective use of low-grade wood // *Aktual'nye aspekty upravleniya i ekonomiki v sovremennykh usloviyakh: sb. materialov IX Vseros. molodezhnogo nauch. foruma (25 sent. - 20 okt. 2017 g.)*. Bryansk, 2017. P. 160-163.
11. Belyaev N.L., Kunickaya O.A. Aspects of labor protection and industrial safety in measuring roundwood: comparison of traditional and remote methods // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2023. № 2. P. 53-60.
12. Kunickaya O.A. Resources of low-grade wood in the subjects of the Russian Federation // *Nauka, obrazovanie, innovacii v prigranichnom regione: materialy respubl. nauch.-prakticheskoy konf. (29 yanv. 2015 g.)*. Petrozavodsk, 2015. P. 15-17.
13. Syunyov V.S., Seliverstov A.A., Gerasimov YU.YU., Sokolov A.P. Logging machines in the focus of bioenergy: constructions, design, calculation: NII lesa Finlyandii METLA, 2011. 143 p.
14. Kunickaya O.A., Davtyan A.B., Pomiguyev A.V. Transport and technological complexes for the production of fuel chips // *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (15 apr. 2021 g.)*. Tyumen', 2021. P. 141-144.
15. Kunickaya O., Pomiguyev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals // *Central European Forestry Journal*. 2022. V. 68, № 1. P. 51-59.
16. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V., Kalita E.G., SHvecova V.V., Tihonov E.A. Analysis of gas generating systems for autonomous power supply of forest terminals // *Resources and Technology*. 2021. V. 18, № 3. P. 53-76.
17. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V., Burmistrova D.D., Ot-mahov D.V., Tihonov E.A., Dmitrieva I.N. Electrochemical power plants for maintenance of forest terminals // *Derevoobrabatival'naya promishlennost'* (Woodworking industry). 2021. № 2. P. 36-46.
18. Kunickaya O.A., Storodubtseva T.N., Pomiguyev A.V. Energy-resource-saving technologies of power supply of forest terminals // *Ekologo-resursosberegayushchie tekhnologii v nauke i tekhnike: materialy Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19-20 okt. 2021 g.)*. Voronezh, 2021. P. 112-117.
19. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V. An effective system for converting thermal energy into electrical energy for power supply of forest terminals // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Sed'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (25 maya 2021 g.)*. Petrozavodsk, 2021. P. 104-105.
20. Kunickaya O.A., Pomiguyev A.V. Functional capabilities and operational characteristics of power supply facilities for forest terminals // *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: materialy Sed'moj Vseros. nac. nauch.-prakticheskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (25 maya 2021 g.)*. Petrozavodsk, 2021. P. 102-103.
21. Fergin V.R. Optimization methods in sawmill and woodworking production. M.: *Lesnaya prom-st'*, 2005. 215 p.
22. David J. Bents. Axial Force and Efficiency Tests of Fixed Center Variable Speed Belt Drive // *SAE Transactions*. 1981. № 810103. P. 438-450.
23. Antushev G.S. Methods of parametric synthesis of complex technical systems. M.: *Nauka*, 1989. 88 p.
24. Himmel'blau D. Applied nonlinear programming. M.: *Mir*, 1995. 534 p.
25. Pizhurin A.A. Optimization of technological processes of woodworking. M.: *Lesnaya prom-st'*, 1995. 312 p.
26. Pizhurin A.A. Modern methods of research of technological processes in woodworking. M.: *Lesnaya prom-st'*, 1992. 247 p.
27. Batishchev D.I. Methods of optimal design. M.: *Radio*, 1995. 216 p.
28. Seryakov S.A., Kunickaya O.A., Grigor'eva O.I. Safety and labor protection during operation and maintenance of pulsed harvester heads // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2023. № 3. P. 27-37.
29. Fomin YA.A. Statistical theory of pattern recognition. M.: *Radio i svyaz'*, 1989. 264 p.
30. Adamenko G.M., Kozyabo L.A. Calculation of the absolute minimum of a function of many variables by a hybrid algorithm. Minsk: *Programmnoe obespechenie EVM*, 2014. Vyp. 34. P. 40-44.
31. Egorov V.I. Forecasting the reliability and durability of logging equipment. M.: *Lesnaya prom-st'*, 2002. 128 p.
32. Ryabuhin P.B., Kazakov N.V., Lucenko E.V. Algorithm for solving the problem of complex assessment of technological processes of timber enterprises // *Vestn. KrasGAU*. 2018. № 1. P. 26-33.