

## Обоснование континуальной модели поточной линии лесопромышленного склада в графическом формате 4D

И.М. Еналеева-Бандура<sup>1а</sup>, Д.В. Лозовой<sup>1б</sup>, Д.Ю. Литвинов<sup>1с</sup>, А.Н. Баранов<sup>1д</sup>, О.А. Куницкая<sup>2е</sup>, А.Ю. Калита<sup>3ф</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, 3, Якутск, Россия

<sup>3</sup> Тихоокеанский государственный университет, 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 13б, Россия

<sup>а</sup> melnikov1978@inbox.ru, <sup>б</sup> dvl92@mail.ru, <sup>с</sup> chess96@mail.ru, <sup>д</sup> aleksandr-baranov-55@mail.ru, <sup>е</sup> ola.ola07@mail.ru,

<sup>ф</sup> Alexgrushina@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

<sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>ф</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Статья поступила 11.04.2025, принята 25.04.2025

*В статье рассмотрено состояние лесопромышленного производства поточных линий. Определена необходимость совершенствования методов моделирования поточных технологий. Кратко проанализированы существующие методы их моделирования. Определено, что существующие методы в основном опираются на осциллограммное представление результатов моделирования. Предложен новый метод моделирования, основанный на матричных преобразованиях координат (МПК). Метод базируется на переходных квадратных диагональных матрицах 5×5. Континуальность моделирования обеспечивается включением в модель независимого параметра время, который в аналитической модели представлен в матрице 5×5 как четвертая координата в пятимерном измерении. Аналитически представлена упрощенная трех агрегатная последовательность выполнения операций разобинения, ориентирования и надрезания на дисковые пилы древесного сырья. Модель представлена в виде координатной системы с последующим пошаговым преобразованием матриц в графическое соответствие. Матрицы преобразованы в графики зависимости перемещений от времени индивидуально для каждого предмета труда. То есть, координатные системы «плавающего типа» связаны с предметом труда. Далее произведено моделирование технологического процесса способом суммирования частных значений времени. Данный способ позволяет построить непрерывную ось времени. Все перемещения в виде графиков связаны последовательно осью времени, что обеспечивает непрерывность протекания процесса выполнения операций в любом пространственном направлении перемещений предмета труда. В конечном итоге изложен порядок построения графической модели поточной линии с последовательным расположением оборудования. Линия представлена графически с конкретной рекомендацией.*

**Ключевые слова:** поточные технологии; матричные преобразования координат; континуальная модель; матрица 5×5; графо-аналитическое моделирование; последовательное агрегатирование; 4D-формат.

## Validation of a continuum model of the flow line of a timber warehouse in 4D graphical format

I.M. Enaleeva-Bandura<sup>1а</sup>, D.V. Lozovoy<sup>1б</sup>, D.Yu. Litvinov<sup>1с</sup>, A.N. Baranov<sup>1д</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>2е</sup>, A.Yu. Kalita<sup>3ф</sup>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup> Pacific State University; 13b, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

<sup>а</sup> melnikov1978@inbox.ru, <sup>б</sup> dvl92@mail.ru, <sup>с</sup> chess96@mail.ru, <sup>д</sup> aleksandr-baranov-55@mail.ru, <sup>е</sup> ola.ola07@mail.ru,

<sup>ф</sup> Alexgrushina@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

<sup>е</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, <sup>ф</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5571-8074>

Received 11.04.2025, accepted 25.04.2025

*The article considers the state of timber industry production of flow lines. The necessity of improving the methods of modeling in-line technologies is determined. The existing methods of modeling in-line technologies are briefly analyzed. It is stated that the existing methods are mainly based on an oscillogram representation of the simulation results. A new modeling method based on matrix coordinate transformations is proposed. The method is based on  $5 \times 5$  transitional square diagonal matrices. The continuity of modeling is ensured by the inclusion of an independent time parameter in the model, which in the analytical model is represented in a  $5 \times 5$  matrix as the fourth coordinate in a five-dimensional dimension. A simplified three-unit sequence of operations for separating, orienting, and pushing wood raw materials onto circular saws is presented analytically. The model is represented as a coordinate system followed by a step-by-step transformation of the matrices into graphical correspondence. The matrices are transformed into graphs of the dependence of movements on time individually for each subject of labor. That is, coordinate systems of the "floating type" are associated with the subject of labor. Next, the technological process is modeled by summing up particular time values. This method allows one to build a continuous time axis. All movements in the form of graphs are connected sequentially by the time axis, which ensures the continuity of the process of performing operations in any spatial direction of movement of the object of labor. In the end, the procedure for constructing a graphical model of a production line with a sequential arrangement of equipment is described. The line is represented graphically with a specific recommendation.*

**Keywords:** flow technologies; matrix coordinate transformations; continuum model;  $5 \times 5$  matrix; grapho-analytical modeling; sequential aggregation; 4D-format.

**Введение.** До 1985 г. в СССР были созданы системы машин для лесосечных, лесовосстановительных, и лесоскладских работ, оптимизированные для использования в различных природно-производственных условиях: от климатических и таксационных до объемно-производственных, таких как объем заготовки древесины и грузооборот лесопромышленного склада. В те времена в нашей стране доминировала хлыстовая заготовка древесины, которая предусматривала вывозку с лесосек на лесопромышленные склады древесного сырья в виде хлыстов, реже деревьев, или полухлыстов. Также была разработана технология заготовки и вывозки древесного сырья в виде полудеревьев, но в производственный процесс лесозаготовительных предприятий она не была внедрена [1–4]. Во время доминирования хлыстовой заготовки и вывозки заготовленной древесины в нашей стране были созданы раскряжевочно-сортировочные поточные линии (основные потоки) для первичной обработки древесного сырья (круглых лесоматериалов) самых разнообразных типов. Среди них линии с продольной и поперечной подачей, с комбинированной подачей, с программной раскряжкой и с ограниченным программированием поперечного раскроя хлыстов. Линии с продольной подачей сырья выпускались серийно. Линии с поперечной подачей были очень привлекательны в силу своей высокой производительности, но при наличии ряда трудно преодолимых недостатков серийный выпуск постоянно откладывался. При этом практически каждая раскряжевочная линия с поперечной подачей представляла собой уникальный образец, т. е. при наличии большого числа узлов и агрегатов и типов линий отсутствовала какая-либо унификация, типизация и агрегатирование. Естественно, это не могло не сказаться на общей технической политике, поскольку унификация и стандартизация, наряду с уменьшением количества не типовых узлов и агрегатов, способствует поиску и нахождению нестандартных решений как в техническом, так и в технологическом плане. Поэтому лесная промышленность на сегодняшний день практически оказалась без перспективных линий и установок для первичной обработки хлыстов или деревьев.

После крушения СССР отечественное лесное машиностроение, ориентированное на выпуск лесных машин для хлыстовой заготовки древесины – валочно-трелевочных, валочно-пакетирующих, также было развалено. На лесозаготовительных предприятиях России начали доминировать системы машин для сортиментной заготовки древесины, прежде всего харвестеры и форвардеры, реже встречаются форвестеры и харвардеры, валочно-трелевочно-процессорные машины [5–10]. На ряде крупных предприятий Сибири сортименты получают на верхних складах при помощи процессоров [11, 12].

Доминирование сортиментной заготовки привело к тому, что такой вид лесопромышленных складов, как нижние склады лесозаготовительных предприятий, также стали редкостью. Ведь именно на них ранее производили первичную обработку заготовленного древесного сырья – раскряжевку и сортировку, реже обрезку сучьев, раскряжевку и сортировку [13].

С одной стороны, сортиментная древесина заготовка доминирует во всем мире. Она позволяет, отказавшись от промежуточных (нижних) лесопромышленных складов, доставлять сортименты различных групп сортировки – породы, размеров, качества, назначения, непосредственно на биржи сырья потребителей или лесоперевалочные базы.

С другой стороны, производство сортиментов на лесосеке, при котором очистка деревьев от сучьев, раскряжевка и сортировка выполняются лесными и лесозаготовительными машинами с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) повышает энергоемкость технологического процесса лесосечных работ, поскольку КПД ДВС значительно ниже, чем у электродвигателей привода стационарных сучкорезных, раскряжевочных, сучкорезно-раскряжевочных установок и сортировочных транспортеров [14–16].

Кроме того, оптимальность раскроя при раскряжке на лесосеке значительно меньше, чем при раскряжке на стационарных раскряжевочных установках лесопромышленных складов, что заметно снижает процент выхода деловой древесины в целом, а также процент выхода целевых сортиментов [17].

В настоящее время на крупных и средних лесопромышленных предприятиях Сибири можно наблюдать тенденцию увеличения объемов заготовки и вывозки древесины в хлыстах с последующей раскряжевкой и сортировкой получаемых сортиментов на лесопромышленных складах (биржах сырья). До начала Специальной военной операции и санкционной войны недружественных стран с Россией эти лесопромышленные предприятия заказывали раскряжевочно-сортировочные линии у европейских производителей, так как выпуск аналогичного оборудования в нашей стране прекращен достаточно давно. В сложившейся политическо-экономической ситуации российским лесозаготовительным предприятиям не из чего выбирать, хотя имеется большое количество научных и конструкторских разработок раскряжевочного оборудования с продольной и смешанной подачей хлыста, и также в СССР был подготовлен серийный выпуск линий с поперечной подачей. Кроме того, были разработаны и ограничено внедрены на крупных лесопромышленных складах линии, предусматривающие групповую (пачковую) обработку деревьев или хлыстов, система ЗНС на установках типа МСГ-3, МСГ-3.1, ЛО-62 [13, 17–19].

Несмотря на то, что вывозить заготовленную древесину из леса в виде деревьев с кроной не выгодно ввиду малого коэффициента полндревесности воза, по мере развития технологий переработки кроновой части деревьев с получением востребованной, высокомаржинальной продукции и подорожанием древесного сырья в целом этот вариант технологического процесса лесосечных работ также начинает становиться востребованным в купе с апробациями технологии заготовки полудеревьями, при которой комлевая и срединная части хлыста в виде делового долготы вывозятся на нижние лесопромышленные склады отдельно, а верхняя часть дерева с кроной – отдельно. При этом для повышения коэффициента полндревесности воза последних можно обеспечить их принудительное уплотнение при погрузке и перевозке [20–22].

Одно раскряжевочное оборудование (слешерные и триммерные линии) является дорогостоящим, металлоемким, требует больших эксплуатационных затрат. Другое оборудование (линии с продольной подачей) такое же дорогостоящее и не соответствует по производительности запросам крупных лесопромышленных компаний. Большой разрыв в производительности линий с продольной подачей и линий с поперечным надвиганием также не способствует востребованности потребителями. Следует отметить, что в свое время, т. е. при отсутствии рыночной экономики, созданная техника свою задачу выполняла. При этом был накоплен огромный научно-конструкторский опыт, который не может быть перечеркнут новыми экономическими отношениями. Необходим глубокий анализ, который позволит сделать необходимые выводы и принять правильное решение при наличии удобного и эффективного моделирования технологического процесса.

В настоящей работе сделана попытка анализа существующих методов моделирования поточных технологий, на основании которого предложен новый метод моделирования, основанный на матричных преобразованиях координат (МПК) и базирующийся на переходных квадратных диагональных матрицах  $5 \times 5$ , при ко-

тором континуальность моделирования обеспечивается включением в модель независимого параметра время.

**Материалы и методы исследования.** Модели обычно представляют в аналитической или графической формах отображения исследуемого процесса. Каждый метод моделирования имеет свои достоинства и недостатки. Например, широко применяемый в технике циклограммный метод имеет удобную графическую интерпретацию и слабую аналитическую [23, 24]. Континуальный метод моделирования поточных технологий PDE [25, 26] опирается на решения уравнений в частных производных, при этом графическое решение представляется в виде циклограмм в двух измерениях (время – безразмерная величина) [24], что также мало информативно на фоне сложного аналитического решения. Методы теории массового обслуживания [24] не решают проблему последовательного агрегатирования поточных линий с оборудованием в количестве более двух.

Разработанный метод матричных преобразований координат (МПК) основан на применении переходных квадратных диагональных матриц  $5 \times 5$ , имеющих графическое толкование в виде векторов, исходящих из начала координатных систем, присвоенных каждому предмету труда, над которым совершаются последовательные операции. Матрица переходная квадратная диагональная представлена ниже выражением (1). В матрице (1)  $5 \times 5$  последний столбец, первые три элемента – координаты предмета труда  $x, y, z$  в старой координатной системе  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ . Четвертый элемент пятого столбца есть независимый параметр – время  $t$ . Пятый элемент пятого столбца – пятая координата, которая принята за единицу [27, 28].

$$m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Произведем описание упрощенной поточной системы, состоящей из трех видов оборудования, которые выполняют следующие операции:

A – разобшение пакета древесных хлыстов;

B – продольная ориентация;

C – надвигание древесных хлыстов на постав пил.

Технологический процесс задан системой координат (рис. 1, а). Перемещения представлены изменением координат начала систем  $O_i X_i Y_i Z_i$  относительно базовой системы  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ , которая совмещена с системой  $O X Y Z$  (условно не показана). Матричная запись базовой системы –  $M = m_0(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}, t; 0, 0, 0, 0)$ . Структурная запись технологического процесса последовательно взаимодействующих агрегатов через предмет труда в сокращенной и развернутой формах записи матриц  $5 \times 5$  выглядит как (2) [29].

$$M_3 = m_1(\vec{i}, t; l_1, t_1) \times m_2(\vec{k}, t; l_2, t_2) \times m_3(\vec{i}, t; l_3, t_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 + l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 + t_2 + t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $M_3$  – результирующая матрица, описывающая структуру поточной линии, из трех последовательно установленных агрегатов (станков); матрица  $m_1$   $i$  (единичный вектор),  $t$  без индекса (указывает на процесс во времени);  $l_1$  (расстояние перемещения, м),  $t_1$  (время перемещения, с). Наличие в сокращенной записи (2) буквы  $t$  без индекса и обозначение одного из ортов  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  указывают на матрицу с координатами  $x_i, y_i, z_i$  и частного значения времени  $t_i$ .

Первому агрегату соответствует матрица  $m_1$  с направлением перемещения по единичному вектору  $\vec{i}$  на расстояние  $l_1$  за время  $t_1$ ; вторая матрица  $m_2$  соответствует второму агрегату в технологической последовательности в направлении вектора  $\vec{k}$  на расстояние  $l_2$  за время  $t_2$ . Матрица  $m_3$  соответствует третьему станку по единичному вектору  $\vec{i}$  на расстояние  $l_3$  за время  $t_3$ . Проанализируем выражение (2) (развернутая часть) – результирующая матрица содержит в пятом столбце координаты радиус – вектора  $x = l_1 + l_3$ ;  $y = 0$ ;  $z = l_2$ , а также сумму частных отрезков времени затраченного на выполнение трех операций ( $t_1 + t_2 + t_3$ ).

Примем допущение – над каждым хлыстом производится операция обработки последовательно А-В-С. Непрерывный поток организуется, если предмет труда в виде хлыста поступает на первую операцию А сразу после освобождении станка, выполнившего операцию В (см. рис. 1). Циклический принцип (см. рис. 1) осуществляется при выполнении операции А только тогда, когда будет выполнена последняя операция С. Четвертый элемент пятого столбца матрицы  $M_3$  (2) представляет собой общую ось времени  $T$ , которая начинается с нулевого значения при поступлении на обработку первого предмета труда и представляет собой непрерывную череду повторяющейся суммы частных циклов обработки  $t_{\Sigma} = t_1 + t_2 + t_3$  и закончится при прекращении графической реализации технологического процесса. При работе в непрерывном режиме происходит совмещение операций, которое возможно при выполнении графического соответствия при создании «плавающих» координат в отличие от абсолютной системы координат [30].

Переходные матрицы (2) имеют графическую интерпретацию в виде радиус-вектора, исходящего из начала координат координатной системы  $O_i X_i Y_i Z_i$ . Ось времени  $t_i$  также исходит из начала координат системы  $O_i X_i Y_i Z_i$ , и для данного векторного перехода располагается на каждой координатной оси  $X_i Y_i Z_i$ .

На рис. 1 а, б, в приведены этапы преобразований векторных перемещений в графики  $|l_i| = f(t_i)$ , а –

пространственное отображение функций  $|l_i| = f(t_i)$ , где  $i = 1, 2, n$ ;  $n$  – количество станков (агрегатов) в технологической последовательности;  $i$  – порядковый номер станка в технологическом потоке;  $b$  – замещение векторов при повороте на  $90^\circ$  и сдвигах на величину  $t_i$  вправо обеспечивает размещение векторов перемещений в одной плоскости, т. е. переход в 4D-формат. На рис. 2, с 1-й позиции соответствует график зависимости перемещений от времени разобинения хлыстов с параметрами:  $|l_1| = 1,6$  м с частным циклом разобинения равным  $t_1 = 7$  сек. Под позицией (2) в нашем случае приведен график пути ориентируемого хлыста (см. рис. 2, с) с параметрами  $|l_2| = 3$  м с циклом  $t_2 = 8$  сек. 3-й позиции соответствует график  $|l_3|$  надвигания древесного ствола на постав дисковых пил. 4-й позиции соответствуют нулевые точки графиков  $t_1, t_2, t_3$ , частные значения циклов на первом, втором, третьем последовательно установленных агрегатах. 5-я позиция соответствует общей оси времени  $T$  секунд,  $T_i = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ , где  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – количество агрегатов в поточной линии.  $i = 1, 2, 3 \dots n$  порядковый номер в последовательности агрегатов (станков). 6-я позиция (6) обозначает частные отрезки времени, которые формируют общую ось времени  $T$ .

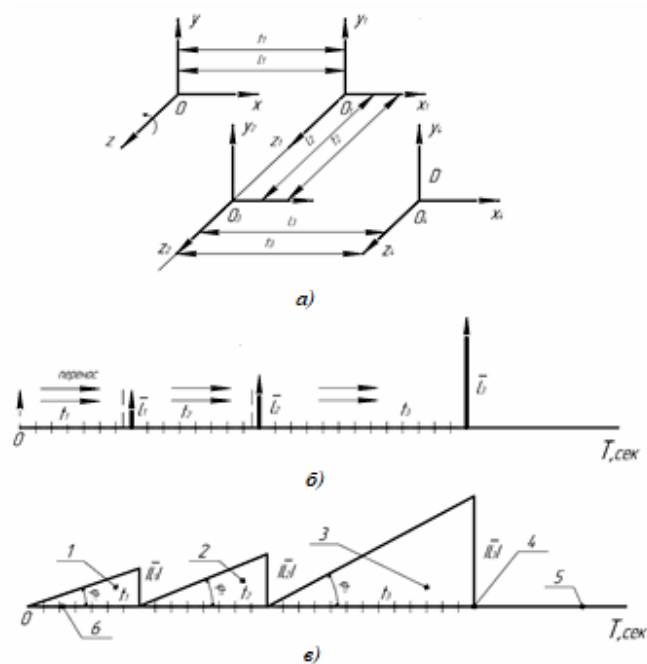
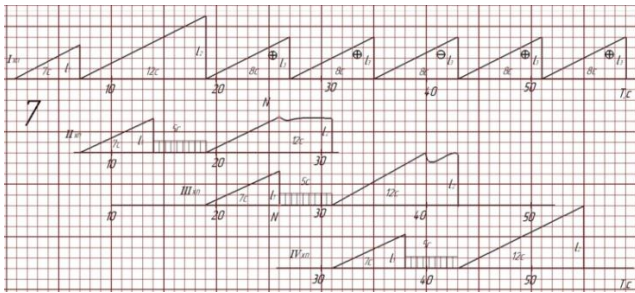


Рис. 1. Схема преобразования матричной записи (2) в графическое соответствие функции  $|l_i| = f(t_i)$ ,  $|l_2| = f(t_2)$ ,  $|l_3| = f(t_3)$ .

При повороте вокруг какой-либо координатной оси против часовой стрелки – знак плюс, при повороте по часовой стрелке – знак минус на все элементы в матрице. Однако в нашем случае в матрицах  $5 \times 5$  введен параметр  $t$  (время), который не может принимать отрицательные значения, поэтому, вопреки правилам, знаки матриц  $5 \times 5$  всегда положительны, исключение составляют противоположные матрицы, которые применяются при моделировании поточных линий циклического действия.

**Результаты исследования.** При применении метода МПК в графическом виде отображаются перемещения по направлению одной из трех координатных осей  $X_i Y_i Z_i$  и частные значения времени перемещений  $t_i$  по каждой операции, которые суммируются и отображаются в виде общей оси времени  $T$ , с. т. е. учитываются три параметра пространственных перемещений и параметр  $t_i$  в виде частных значений времени затраченного на обработку на  $i$ -том агрегате плюс параметр скорости  $V_i$  предмета труда на каждой операции. При этом все параметры возможно корректировать в любое время проведения вычислительного эксперимента или при нарушениях синхронности работы последовательно установленных станков (агрегатов). Метод МПК аналитически описывает при помощи переходных матриц поточные линии, состоящие из более чем двух станков, а также позволяет проводить структурный анализ по функциональным возможностям оборудования, включенного в поточную линию. При моделировании методом МПК взаимодействия отдельных станков описываются графиками зависимости перемещений от времени, которые объединены в общую модель главным параметром в виде оси времени (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Графическая модель первичной обработки древесного сырья (хлыстов) поточной линией, состоящей из трех последовательно установленных агрегатов: разобщик древесных хлыстов ( $l_1 = 1,6$  м;  $t_1 = 7$ , ориентирующий шнековый транспортер ( $l_2 = 3,0$  м;  $t_2 = 12$  с); поперечный транспортер надвигающий на пилю ( $l_3 = 2,0$  м;  $t_3 = 8$  с).

На рис. 2 представлена модель дискретно-непрерывной поточной линии с установленными параметрами  $l_1 = 1,6$  м;  $t_1 = 7$ ;  $l_2 = 3,0$  м;  $t_2 = 12$  с;  $l_3 = 2,0$  м;  $t_3 = 8$  с при соглашении – на втором агрегате (шнековом ориентирующем транспортере) всегда должен находиться один предмет труда, поскольку ориентация в большинстве случаев индивидуальна для каждого древесного хлыста. Первая строка и последующие три строки базируются на оси времени. В любом вертикальном сечении физическое значение времени одинаково. На рис. 2 римскими цифрами (Iхл IIхл IIIхл IVхл) обозначены номера древесных хлыстов, поданных на обработку. Упоры слешера обозначены графиками зависимости перемещений от времени на верхней строке в виде непрерывных повторений графиков, поскольку упоры между собой имеют жесткую связь в виде цепей транспортера.

Взаимосвязь агрегатов между собой обуславливается условиями переходного режима. Предмет труда на данной модели совершает мгновенный переход с одного агрегата на другой при следующем условии: пере-

ходный режим по времени укладывается в цикл обработки  $t_i$  (в частное значение времени). При наличии других условий или особенностей переходного режима метод матричных преобразований координат позволяет включить в модель квазиоперацию, которая учтет особенности переходного режима.

Далее, первый разобщенный хлыст (Iхл) совершает переход на шнековый ориентирующий транспортер (см. рис. 2) на 7-й секунде. Вторая, третья и четвертая строки соответствуют обработке второго (IIхл), третьего (IIIхл) и четвертого (IVхл) хлыстов.

Второй хлыст во второй строке должен перейти на операцию ориентации через 7 секунд. Завершение операции должно произойти на 14 секунде (строка IIхл) общего времени  $T$ , с. При вертикальном сечении первой и второй строки на 14 секунде общего времени видно, что первый хлыст не завершил операцию ориентации и находится на расстоянии 1,7 м от исходной позиции данного агрегата ( $l_2$  в первой строке).

Принимаем решение: II хлыст необходимо задержать на 5 с, чтобы произвести переход на нулевую отметку второго агрегата. Задержке соответствует заштрихованная область во второй строке. После задержки хлыст переходит на второй агрегат с циклом  $t_3 = 12$  с на 19 секунде.

Следует обратить внимание на наличие совмещения операций в сечениях 20–30 с.

Задержка подачи хлыста на 5 с обеспечивает наличие на шнековом транспортере одного хлыста (предмет труда идет на проход). Главная цель рассмотренного технологического процесса заключается в своевременной заполняемости упоров слешера с циклом  $t_3 = 8$  с. Процесс моделирования методом матричных преобразований координат заключается в отслеживании взаимного расположения четырех хлыстов (в нашем случае) на всех агрегатах (станках) при организации дискретно-непрерывных технологий. На рис. 2 на 19 секунде – первый переход первого хлыста на упоры слешерного стола. Заполненный упор обозначен знаком + (плюс).

Второй упор на 31 секунде заполнен вторым хлыстом.

Третий упор не заполнен – знак - (минус), причина объясняется требованием «один хлыст» на шнековом транспортере, которое выполняется задержками при подаче хлыстов на ориентирование (заштрихованная область задержки на 5 с). То есть при сечении графиков, например, на 42 секунде общего времени, видим, что второй хлыст заполнил упоры слешера на 31 секунде, третий хлыст попадает на ноль отметку четвертого по счету упора на 43 секунде, минуя третий упор (знак минус). В результате анализа графической модели выявлена необходимость установки дополнительного устройства для обеспечения задержки древесного хлыста, которое позволит регулировать количество хлыстов на шнековом ориентирующем транспортере. На известной отечественной линии ЛО-105 такое устройство имеется.

**Выводы.** На сегодняшний день практически отсутствует теоретическая база, которая позволяла бы объединить полученные результаты по созданию раскрывочных установок в предшествующие периоды, позволила бы перейти к автоматизированному анализу

и синтезу технологий по первичной обработке древесного сырья. Ранее были опубликованы работы по структурному анализу поточных линий, который всегда проводится перед процессом моделирования. При этом строится граф или структурная модель линии с указанием пути, проходимом предметом труда за цикл обработки, создается последовательность размещения координатных систем на предмете труда, перемещающегося за один цикл. Далее назначаются или рассчитываются основные параметры поточной линии в виде скоростей и расстояний перемещения предмета труда за цикл обработки на отдельном агрегате. Однако еще не освещен вопрос графического соответствия матриц  $5 \times 5$  при моделировании поточных линий с продольной подачей предмета труда лесопромышленного комплекса. Недостаточно проработаны вопросы практического характера – особенности создания графических моделей с учетом изменения скоростей перемещения предмета труда (древесных хлыстов) на специфических для лесной промышленности агрегатах.

Главной задачей структурно-кинематического анализа линий для первичной обработки хлыстов является установление рациональности расположения отдельных агрегатов в общем потоке. Каждому из них соответствуют свои индивидуальные кинематические параметры, которые отвечают назначению агрегата. Агрегаты взаимодействуют между собой посредством предмета труда. Сбои в работе общего потока имеют место практически на каждой линии. Но необходимо установить, какие перебои в работе поточных линий привнесены случайными событиями, а какие могут быть исключены в процессе работы при проектировании или правильным подбором агрегатов с соответствующими кинематическими параметрами переменными или постоянными. При этом немаловажным оказывается вопрос для поточных линий: где в любой момент протекания технологического процесса находится  $i$ -ый предмет труда?

#### Литература

1. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Тр. Белорус. гос. технологич. ун-та. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109–116.
2. Тихонов И.И., Григорьев И.В. Технологический процесс лесосечных работ при вывозке древесины полудеревьями // Мат-лы шестой всеросс. науч.-технич. конф. «Вузовская наука – региону» Т. 1. Вологда: Изд-во Волог. гос. техн. ун-та, 2008. С.188–189.
3. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Жукова А.И. Способ проведения лесозаготовительных работ. Патент на изобретение RU 2374829 C1, 10.12.2009. Заявка № 2008110358/12 от 20.03.2008.
4. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Процессы лесосечных работ. Хлыстовая и сортиментная технологии // Лесозаготовка. Бизнес и профессия. 2015. № 1. С. 18–22.
5. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Вернер Н.Н. Системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 5 (31). С. 438–443.
6. Григорьева О.И., Макуев В.А., Барышникова Е.В., Бурмистрова О.Н., Швецова В.В., Григорьев И.В., Иванов В.А. Перспективы импортозамещения систем машин для искусственного лесовосстановления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3 (55). С. 78–84.
7. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: мат-лы науч.-технич. конф. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2016. С. 112–114.
8. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Сравнение одномашинных комплексов для сортиментной заготовки древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 9-2 (20-2). С. 125–128.
9. Швецов А.С., Кривошеев А.А., Должиков И.С., Григорьев И.В., Курочкин П.А., Григорьева О.И. Рациональные приемы выполнения рубок лесных насаждений универсальной лесозаготовительной машиной // Вестн. Арктич. гос. агротехнологич. ун-та. 2024. № 1 (13). С. 48–65.
10. Григорьева О.И., Бауер-Бимштейн Н.А., Трушевский П.В., Михайлова Л.М., Григорьев И.В. Практика проведения машинных рубок ухода по скандинавской технологии в Пермском крае // Вестн. Арктич. гос. агротехнологич. ун-та. 2024. № 2 (14). С. 68–91.

*Часть материалов исследования получена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.*

11. Григорьев И.В., Газизов А.М., Григорьева О.И. Новые технологические процессы лесосечных работ // Вестн. Башкир. гос. аграр. ун-та. 2016. № 2 (38). С. 97-102.
12. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Эффективность лесопользования в России // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 5. С. 24-30.
13. Пятакин В.И., Редькин А.К., Базаров С.М., Бирман А.Р., Бит Ю.А., Григорьев И.В., Шадрин А.А., Чемоданов А.Н. Технология и оборудование лесных складов и лесоперерабатывающих цехов: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2008. 384 с.
14. Александров И.К., Григорьев И.В., Иванов В.А., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Методика определения топливной экономичности бензомоторных пил // Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та. 2010. № 2 (41). С. 112-117.
15. Григорьев И.В., Иванов В.А., Вернер Н.Н., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Влияние качества изготовления пильных цепей на энергетическую эффективность процесса пиления // Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та. 2011. № 4 (55). С. 140-144.
16. Григорьев И.В. Направления совершенствования харвестерных головок // Повышение эффективности лесного комплекса. Мат-лы Шестой Всеросс. национал. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводск. гос. ун-та, 2020. С. 45-47.
17. Куницкая О.А., Тихонов И.И., Куницкая Д.Е., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Оптимизация процесса раскряжевки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпилке сырья для матчопропиточных заводов // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86-93.
18. Рябухин П.Б., Григорьев И.В., Трушевский П.В., Курочкин П.А., Охлопкова М.К., Жук А.Ю. Постановка задачи поиска оптимальных параметров конструкции установки для групповой раскряжевки пачек порубочных остатков // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 130-137.
19. Рябухин П.Б., Григорьев И.В. Определение натяжения несущего каната гибкого режущего органа в процессе работы установки для пачковой раскряжевки // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 63-72.
20. Григорьев И.В., Никифорова А.И., Хахина А.М. Новые технические решения для повышения эффективности лесосечных работ // Вестн. Моск. гос. ун-та леса. Лесной вестник. 2013. № 1. С. 46-49.
21. Григорьев И.В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Мат-лы Всеросс. науч.-практич. конф. Красноярск: Изд-во Сибир. гос. ун-та науки и технологий, 2022. С. 165-169.
22. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Лесовозный транспорт. Патент на полезную модель RU 119206 U1, 20.08.2012. Заявка № 2012120320/13 от 17.05.2012.
23. Коробецкий Ю.П., Рамазанов С.К. Имитационные модели в гибких системах. Луганск: Изд-во Восточноукр. национал. ун-та, 2003. 280 с.
24. Сердюк А.И., Рахматуллин Р.Р., Зеленин А.П. Метод циклограмм в исследовании гибких производственных ячеек. модели и алгоритмы: монография. Оренбург: Изд-во Оренбург. гос. ун-та, 2009. 208 с.
25. Пигнастый О.М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий // Вост.-Европ. журнал передовых технологий. Сер. Математика. 2014. С. 3-12.
26. Пигнастый О.М., Заруба В.Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконф. по проблемам управления: тезисы докл. 6-ой Всеросс. науч.-практич. конф. (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября-5 октября 2013 г.). Т. 3. Ростов -на-Дону: Изд-во Южного федерал. ун-та, 2013. С. 157-161.
27. Крейнин Г.В. Кинематика, динамика и точность механизмов. Справочник. М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
28. Лозовой В.А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжевых линий // Лесозаготовка: межвуз. сб. научн. тр. Красноярск: Изд-во Сиб. гос. технич. ун-та, 1998. С. 133-139.
29. Лозовой В.А., Никончук М.Ю., Литвинов Д.Ю. Концепция моделирования поточных технологий методом матричных преобразований координат // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40, № 6. С. 552-557.
30. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journ. of Applied Mechanics. 1955. Vol. 22, trans. ASME, vol. 77, series E. P. 215-221.

## References

1. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Nikiforova A.I., Glukhovskiy V.M. Promising directions for the development of technological processes of logging plants // Proceedings of BSTU. № 2. Forestry and woodworking industry. 2016. № 2 (184). P. 109-116.
2. Tikhonov I.I., I.V. Grigorev Technological process of logging operations during the removal of wood by semi-trees // Materials of the sixth All-Russian scientific and technical conf. «University Science for the region». Vologda: Publishing house of the Vologda State Technical University, 2008. Vol. 1. P.188-189.
3. Tikhonov I.I., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Zhukova A.I. Method of logging operations. Patent for invention RU 2374829 C1, 12/10/2009. Application № 2008110358/12 dated 03/20/2008.
4. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Processes of logging operations. Whiplash and sorting technology // Logging. Business and profession. 2015. № 1, P. 18-22.
5. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Werner N.N. Machine systems for the creation and operation of forest plantations // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2017. Vol. 5, № 5 (31). P. 438-443.
6. Grigoreva O.I., Makuev V.A., Baryshnikova E.V., Burmistrova O.N., Shvetsova V.V., Grigorev I.V., Ivanov V.A. Prospects of import substitution of machine systems for artificial reforestation // System. Methods. Technologies. 2022. № 3 (55). P. 78-84.
7. Grigoreva O.I., Nguyen F.Z. Promising technology for logging forest maintenance // Forests of Russia: politics, industry, science, education: materials of the scientific and technical conf. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State Forestry Technological University, 2016. P. 112-114.
8. Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Comparison of single-machine complexes for cement harvesting of wood // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3, № 9-2 (20-2). P. 125-128.
9. Shvetsov A.S., Krivosheev A.A., Dolzhikov I.S., Grigorev I.V., Kurochkin P.A., Grigoreva O.I. Rational techniques for cutting forest plantations with a universal logging machine // AGATHU's Messenger. 2024. № 1 (13). P. 48-65.
10. Grigoreva O.I., Bauer-Bimshtein N.A., Trushevsky P.V., Mikhailova L.M., Grigorev I.V. The practice of carrying out care cabins using Scandinavian technology in the Perm Region // Bulletin of the Arctic State Agrotechnological University. 2024. № 2 (14). P. 68-91.
11. Grigorev I.V., Gazizov A.M., Grigoreva O.I. New technological processes of logging operations // Bulletin of the Bashkir State Agrarian University. 2016. № 2 (38). P. 97-102.

12. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Efficiency of forest management in Russia // *Energy: economics, technology, ecology*. 2016. № 5. P. 24-30.
13. Patyakin V.I., Redkin A.K., Bazarov S.M., Birman A.R., Bit Yu.A., Grigorev I.V., Shadrin A.A., Chem-modanov A.N. Technology and equipment of timber warehouses and timber processing workshops: a textbook for university students studying. Moscow: Publishing House Moscow State University of Forests, 2008. 384 p.
14. Alexandrov I.K., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. Methodology for determining the fuel efficiency of gasoline-powered saws // *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2010. № 2 (41). P. 112-117.
15. Grigorev I.V., Ivanov V.A., Werner N.N., Yelizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. The influence of the quality of saw chains on the energy efficiency of the sawing process // *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*. 2011. № 4 (55). P. 140-144.
16. Grigorev I.V. Directions for improving harvester heads // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conf. with internat. participation. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University Publishing House, 2020. P. 45-47.
17. Kunitskaya O.A., Tikhonov I.I., Kunitskaya D.E., Grigorev I.V., Zemtovsky A.E. Optimization of the process of buckling whips at timber processing plants of forest holdings when sawing raw materials for machine-feeding plants // *Tidings higher educational institutions. Forest Journ.* 2014. № 3 (339). P. 86-93.
18. Ryabukhin P.B., Grigorev I.V., Trushevsky P.V., Kurochkin P.A., Okhlopova M.K., Zhuk A.Yu. Formulation of the problem of finding optimal parameters of the installation structure for group bucking of felling residues // *Systems. Methods. Technologies*. 2024. № 1 (61). P. 130-137.
19. Ryabukhin P.B., Grigorev I.V. Determination of the tension of the bearing rope of a flexible cutting body during operation of the installation for sheafing // *The system. Methods. Technologies*. 2021. № 4 (52). P. 63-72.
20. Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Khakhina A.M. New technical solutions to increase the efficiency of logging operations // *Bulletin of the Moscow State University of Forests. Forestry Bulletin*. 2013. № 1. P. 46-49.
21. Grigorev I.V. Modern problems of import substitution in forestry engineering of the Russian Federation // *Innovations in the chemical and forestry complex: trends and development prospects. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conf.* Krasnoyarsk: Publishing House of Siberian State University of Science and Technology, 2022. P. 165-169.
22. Tikhonov I.I., Grigorev I.V., Nikiforova A.I., Grigorieva O.I. Logging transport. Patent on the official website RU 119206 U1, 08/20/2012. Application № 2012120320/13 dated 05/17/2012.
23. Korobetsky Yu.P., Ramazanov S.K. Simulation models in flexible systems. Lugansk: Publishing house of the East Ukrainian National Univ., 2003. 280 p.
24. Serdyuk, A.I., Rakhmatullin, R.R., Zelenin, A.P. The cyclogram method in the study of flexible production cells. models and algorithms: monography. Orenburg: Orenburg State University Publishing House, 2009. 208 p.
25. Pignastyi O.M. Fundamentals of the statistical theory of constructing continuous models of production lines // *East European Journ. of Advanced Technologies. Ser. Mathematics*. 2014. P. 3-12.
26. Pignastyi O.M., Zaruba V.Ya. Continuous modeling of production on production lines // *Multi-conf. on management problems: abstracts of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conf. (MCPU-2013), (Divnomorye, September 30-October 5, 2013). Vol. 3.* Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2013. P. 157-161.
27. Kreinin G.V. Kinematics, dynamics and precision of mechanisms. A reference book. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 224 p.
28. Lozovoy, V. A. Matrix transformation of coordinates applied to the structural analysis of bucking lines // *Lesoexploitation: interuniversity collection of scientific papers*. Krasnoyarsk: Publishing house of Sib. state technical university, 1998. P. 133-139.
29. Lozovoy V.A., Nikonchuk M.Yu., Litvinov D.Yu. The concept of modeling flow technologies of meto-house of matrix transformations of coordinates // *Conifers of the boreal zone*. 2022. Vol. 40, № 6. P. 552-557.
30. Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic number system for lower pair mechanisms based on matrices // *Journ. of Applied Mechanics*. 1955. Vol. 22, translated from English ASME, vol. 77, ser. E. P. 215-221.