

DOI: 10.15393/j2.art.2026.8804

УДК 630*848

Статья

Матричный метод моделирования поточных линий лесопромышленного комплекса

Еналеева-Бандура Ирина Михайловна

доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), melnikov1978@inbox.ru

Лозовой Дмитрий Владимирович

аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), dvl92@mail.ru

Литвинов Даниил Юрьевич

аспирант, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), chess96@mail.ru

Баранов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева (Российская Федерация), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Задраускайте Наталья Олеговна

кандидат технических наук, доцент, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Российская Федерация), n.zadrauskaite@narfu.ru

Получена: 29 июля 2025 / Принята: 14 января 2026 / Опубликовано: 31 января 2026

Аннотация: Поточные линии на предприятиях лесопромышленного комплекса и сеть транспортных механизмов, агрегатов и машин обеспечивают заданные объёмы и качество продукции в соответствии с требованиями рынка. Следует отметить, что значительная часть транспортных операций связана с первичной обработкой древесного сырья в индивидуальном порядке, т. е. имеется тесная

связь поточных линий (например, раскряжёвочных) с операциями сортировки, окорки, подачи в цех лесопиления и др. При этом приходится индивидуально проектировать не только раскряжёвочные поточные линии, но и примыкающее оборудование, которое в общем случае имеет нестандартные параметры и может представлять собой отдельный поток. В статье предлагается обобщающий подход к описанию структуры поточных линий переходными матрицами 4×4 и 5×5 в сокращённой (аналитической) и развёрнутой формах записи переходными квадратными единичными диагональными матрицами, позволяющими описать разные уровни расположения оборудования. Для наглядности метод моделирования рассмотрен для последовательности поточной линии из пяти агрегатов, размещённых на трёх уровнях (x , y , z). При этом структура описывается аналитически диагональными единичными матрицами 4×4 с последующей интерпретацией в виде векторного уравнения с графическим решением в виде пространственной суммы векторов. Векторное уравнение позволяет получить значения скоростных характеристик предмета труда во время выполнения последовательных операций. Переход от векторной модели к континуальной производится преобразованием структуры модели из матриц четырёхмерного формата в пятимерный добавлением пятого измерения в виде оси времени. Рассмотрен вариант поточной линии (для упрощения из трёх агрегатов) с описанием структуры переходными матрицами 5×5 , которые обеспечивают переход к континуальности моделирования технологического процесса. Далее подробно рассмотрено графическое соответствие переходных матриц 5×5 графикам зависимости перемещений от времени, которое обеспечивает визуализацию континуальной модели технологического процесса поточной линии с последовательным расположением оборудования в количестве более двух. В заключении представлена графическая модель идеальной поточной линии в формате 4D. Основой модели являются графики зависимости перемещений предмета труда от времени на станках (агрегатах), которые получены при переходе от четырёхмерной модели к пятимерной на основе переходных матриц.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, поточные технологии, континуальная модель, графоаналитическое моделирование

DOI: 10.15393/j2.art.2026.8804

Article

Matrix method of modeling production lines of the timber industry complex

Irina Enaleeva-Bandura

D. Sc. in engineering, associate professor, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev (Russian Federation), melnikov1978@inbox.ru

Dmitry Lozovoy

Ph. D. student, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev (Russian Federation), dvl92@mail.ru

Daniil Litvinov

Ph. D. student, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev (Russian Federation), chess96@mail.ru

Alexander Baranov

Ph. D. in engineering, associate professor, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev (Russian Federation), aleksandr-baranov-55@mail.ru

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Natalia Zadrauskaite

Ph. D. in engineering, associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Russian Federation), n.zadrauskaite@narfu.ru

Received: 29 July 2025 / Accepted: 14 January 2026 / Published: 31 January 2026

Abstract: Continuous production lines at the enterprises of the forestry complex and the network of transport mechanisms, assemblies and machines provide specified volumes and quality of products in accordance with the requirements of the market. It should be noted that a significant part of transport operations is associated with the primary conversion of wood raw materials on an individual basis. That is, there is a close relationship between the continuous production lines, for example,

a crosscutting line, with operations of wood saw material sorting, debarking, infeeding, etc. At the same time, not only crosscutting lines should be designed individually, but also adjacent equipment, which generally does not meet standard parameters and may be combined in a separate line. The article proposes a generalizing approach to describing the structure of continuous production lines with transitional matrices 4×4 and 5×5 in abbreviated (analytical) and expanded forms of recording by transitional single diagonal matrices to describe different levels of equipment location. For clarity, the modeling method is considered for the sequence of a continuous production line of five units located at three levels (x, y, z). In this case, the structure is described by analytically diagonal single matrices of 4×4 with the subsequent interpretation in the form of a vector equation with a graphic solution in the form of a spatial number of vectors. The vector equation allows obtaining the values of the speed characteristics of the subject of labor during consecutive operations. The transition from the vector model to the continuity one is performed by transforming the structure of the model from matrices of the four -dimensional format to the five – dimensional one by addition of the fifth measurement in the form of an axis of time. The authors consider a variation of continuous production line (for simplicity, consisting of three units) with a description of the structure with transition matrices 5×5 , which ensure the transition to the continuity of the modeling process. Further, the graphic compliance of the 5×5 transition matrices is considered in detail by the dependence of the movements on the time that ensures the visualization of the continual model of the technological process of the continuous production line with the sequential location of more than two units of the equipment. In conclusion, a graphic model of an ideal continuous production line in 4D format is presented. The basis of the model is the dependence graph of the object of labor movements on time on machines (units), obtained when the four -dimensional model is transformed into the five -dimensional one based on transitional matrices.

Keywords: timber industry complex, streaming technologies, continuity model, graphoanalytical modeling

1. Введение

Лесозаготовительный комплекс Российской Федерации при первичной обработке древесного сырья в прошлом базировался на широком использовании поточных технологий. Практически каждый средний (с годовым грузооборотом $Q_{\text{год}}$ 100—200 тыс. м³) и, тем более, крупный лесопромышленный склад имел возможность работать над повышением выхода деловой древесины путём повышения механизации и автоматизации производства с вводом в эксплуатацию дополнительного оборудования, машин, которые увеличивали номенклатуру выпускаемой продукции за счёт вовлечения в производство низкокачественного и низкотоварного древесного сырья [1—4]. Принципиально этот подход не изменился, за исключением значительного сокращения работ на нижних лесопромышленных складах, отсутствием собственных разработок поточных технологий, агрегатов и машин, адаптированных к новым условиям работы лесопромышленного комплекса [5—7]. Поточные технологии используются практически везде — производство балансов, сортиментов различного назначения, поточные линии для переработки крупномерного древесного сырья, потоки древесно-подготовительных цехов и т. д. [8—11].

Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в области лесного машиностроения, включая поточные технологии, в условиях серийного и мелко-серийного производства машин и оборудования для заготовки и переработки сырья лесопромышленного комплекса невозможно без привлечения эффективного моделирования, как систем машин и оборудования, реализующих технологические процессы, так и отдельных операций этих технологических процессов, и процессов в целом [12—15]. На сегодняшний день моделирование поточных линий с последовательно размещённым оборудованием в количестве более двух затруднено из-за отсутствия методов формализации, адекватно описывающих технологический процесс [16], [17]. В машиностроении наиболее распространённым методом моделирования поточных линий является метод циклограмм (рисунок 1) [18].

По вертикали $n_{\text{ум}}$ — порядковый номер дискретного предмета труда, обработанного на трёх станках; по горизонтали — циклы обработки предмета труда на каждом из трёх станков (в сумме формируется ось времени T , с).

Циклограмма представляет собой модель технологической обработки четырёх предметов труда (по вертикали) на последовательно установленных трёх станках с циклами выполнения операций t_1 t_2 t_3 (нижний индекс — порядковый номер станка по горизонтали). Операции выполняются последовательно — первый предмет труда (верхняя строка) обрабатывается за время t_1 (8 с). На 9-й с производится мгновенный переход на второй станок с циклом t_2 , на 16-й с первый предмет труда переходит на третий станок с циклом обработки t_3 . Под переходом имеется в виду действие, связанное с изменением типа операции. В данном случае переход от операции к операции происходит за счёт времени ∇t_i . При этом время операций на каждом станке одинаково $t_1 = t_2 = t_3$. Переходные режимы также равны.

В этих условиях модель относится к идеальным моделям, поскольку отсутствуют задержки и вынужденные прерывания технологического процесса. В реальности поточная линия работает в режиме отсутствия синхронизации между станками, которая нарушается, прежде всего, значительной вариативностью параметров предмета труда лесозаготовительного производства [19], [20].

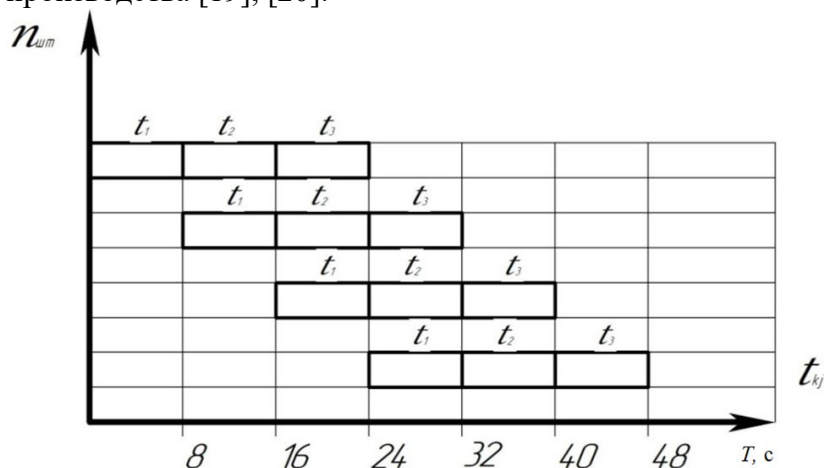


Рисунок. 1. Пример циклограммы технологического процесса дискретно-непрерывного типа (идеальная модель технологического процесса [18]) [рисунок авторов]

Figure 1. An example of a cyclogram of a technological process of a discrete-continuous type (an ideal model of a technological process [18])

Ограничивает применение метода циклограмм невозможность широкого анализа совмещения операций при пространственном расположении последовательно установленного оборудования, наряду с отсутствием континуальности (непрерывности описания технологического процесса) [21—24]. В данной статье излагается новое направление моделирования лесопромышленных поточных технологий с применением идеальной модели [18], в которой синхронизированы циклы обработки на агрегатах. При проведении моделирования технологического процесса искусственно вводятся нарушения синхронности случайного характера или изменения параметров исходного оборудования, т. е. производится имитация различных воздействий с постепенным переходом от идеальной модели к псевдо-реальной. Поточные технологии в лесопромышленном комплексе очень разнообразны в смысле дискретности и непрерывности технологических операций [25]. Дискретность определяется предметом труда — деревья, хлысты, сортименты и др., которые поступают в обработку дискретно. Оборудование выполняет технологические операции непрерывно (континуально) или циклически [22]. Для непрерывных линий цикл обработки на последовательно установленном оборудовании подчиняется заданному ритму станка, который является ведущим, при этом желательны совмещения операций. Например, известная поточная линия ЛО-105 имеет следующее последовательно установленное оборудование [26]:

разгрузочно-растаскивающее устройство (РРУ); разобщик древесных хлыстов ЛТХ-80; ориентирующий транспортёр шнекового типа (ориентация по двум координатным осям X и Z (вдоль и поперёк продольной оси древесного хлыста). При необходимости данный транспортёр может играть роль буферного магазина переменной ёмкости (например, на шнеках может размещаться несколько древесных хлыстов); сбрасыватель для приостановки подачи хлыста на поперечный транспортёр (ожидание благоприятного расположения упоров); слешер ЛО-105 с поперечным транспортёром надвигания на стационарные дисковые пилы.

РРУ работает с пакетами из хлыстов, при этом подаёт пакеты хлыстов в разобщик ЛТХ-80, который разобщает хлысты (отделяет хлысты от пакета) и выдаёт одиночные хлысты на ориентирующий транспортёр и далее на слешер.

Технологическая матрица, характеризующая континуальность (непрерывность) технологического процесса, выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $B_1 — B_4$ — матрицы, описывающие отдельные операции посредством переходных матриц.

Матрица (1) является концептуальным представлением непрерывного (континуального) технологического процесса.

Дискретно-циклический процесс характеризуется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Матрицы (1), (2) являются грубой моделью технологической последовательности операций, но с достаточной точностью характеризующих цикличность или непрерывность протекания процессов.

2. Материалы и методы

Приведём описание структуры поточных линий переходными матрицами 4×4 . В общем случае переходной матрице соответствует вектор R , исходящий из начала координат OXYZ с координатами x_1, y_1, z_1 (рисунок 2).

Отличительной чертой известных поточных линий является расположение оборудования в плоскостях OXY, OXZ, OZY ортогональной системы координат (см. рисунок 2). Данное обстоятельство значительно упрощает аналитическое и графическое отображение технологического процесса, поскольку в большинстве случаев векторы переходных матриц имеют параллельное осям X, Y, Z перемещение. При этом переходные матрицы имеют графическое соответствие: ноль-вектор и начало вектора R совпадают с началом координат

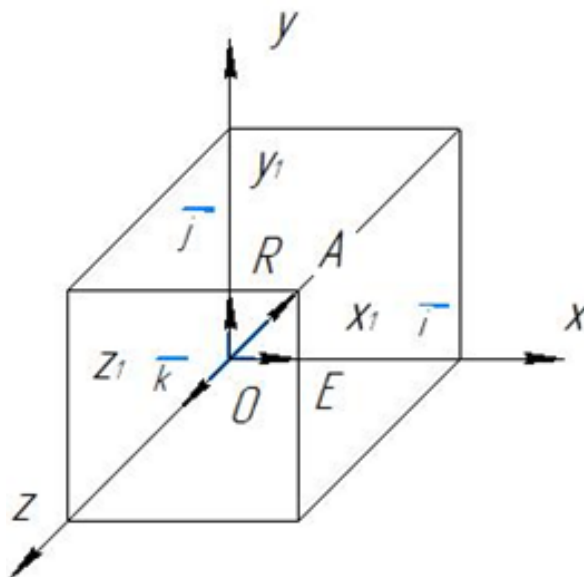


Рисунок. 2. Радиус-вектор R , исходящий из начала координатной системы OXYZ, x_1, y_1, z_1 — координаты радиус-вектора R ; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — направляющие единичные векторы [рисунок авторов]

Figure 2. Radius-vector R starting from the origin of the coordinate system OXYZ, x_1, y_1, z_1 — are the coordinates of the radius-vector R ; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — are the guiding unit vectors

базовой системы, что отобразится в сокращённой [27] и развёрнутой записях квадратной матрицы 4×4 , которая размещается на предмете труда:

$$M_0 = m_0(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0), \quad (3)$$

где M_0 — базовая матрица на предмете труда; m_0 — матрица квадратная единичная с координатами x, y, z , в данном случае $x = y = z = 0$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — направляющие векторы, указывающие в сокращённой записи на наличие численных значений координат радиус-вектора R .

$$M_1 = m(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

В формуле (4) исходя из сокращённой записи (3) $x = 0, y = 0, z = 0$ координаты ноль-вектора.

Описание перемещений вдоль координатных осей X, Y, Z на примере поперечного транспортёра (рисунок 3).

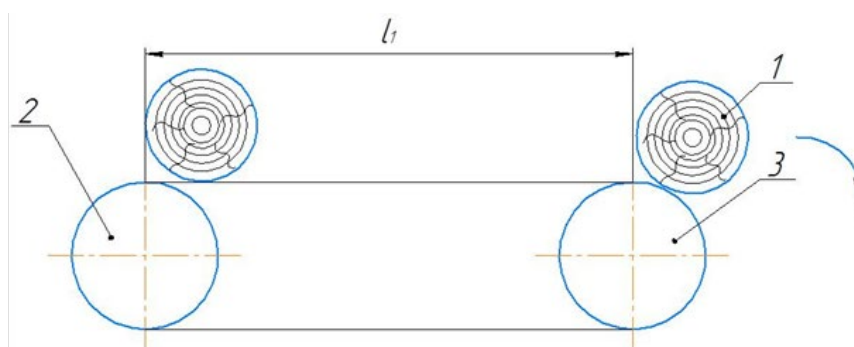


Рисунок 3. Поперечный транспортёр с предметом труда: 1 — древесный хлыст, 2 — поперечный транспортёр, l_1 — расстояние перемещения [рисунок авторов]

Figure 3. Transverse conveyor with the object of labor: 1 — tree length stem, 2 — transverse conveyor, l_1 — travel distance

В аналитическом виде перемещение на расстояние l_1 (рисунок 4) будет записано следующим образом [28]:

$$M_1 = m(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0) \cdot m_1(\vec{i}, l_1) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Запишем перемещение предмета труда при помощи преобразования координат (см. рисунок 4).

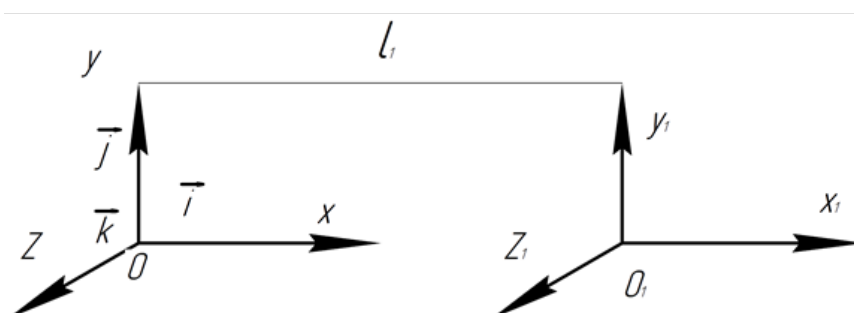


Рисунок 4. Система координат при переходе от OXYZ к O₁X₁Y₁Z₁ посредством переходной матрицы m_1 , выражение (5) размещается на предмете труда (плавающий метод задания координат [28]) [рисунок авторов]

Figure 4. The coordinate system during the transition from OXYZ to O₁X₁Y₁Z₁ by means of the transition matrix m_1 , expression (5) is placed on the object of labor (floating coordinate setting method [28])

Обозначения: m — базовая матрица, описывающая ноль-вектор, расположенный на предмете труда в заранее обусловленном месте; матрица m_1 — переходная матрица перемещения начала координат O в положение O_1 на расстояние l_1 (см. рисунок 4). При наличии последующих перемещений по осям Y, Z .

По аналогии запишем перемещение вдоль оси Y :

$$M_2 = m_2(\vec{j}, l_2) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

При перемещении вдоль оси Z имеем:

$$M_3 = m_3(\vec{k}, l_3) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

Для наглядности представим наши преобразования применительно к предмету труда, который совершает технологические перемещения подготовки к поперечному раскрою (раскряжёвке) (рисунок 5).

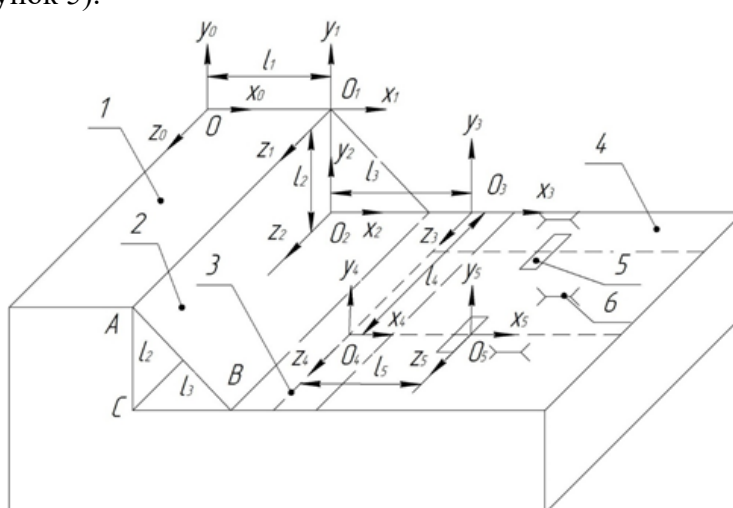


Рисунок 5. Схема размещения координатной системы для технологических перемещений предмета труда: 1 — поперечный транспортёр, 2 — наклонная поверхность А — В; 3 — продольный транспортёр; 4 — слешерный стол; 5 — упоры поперечного транспортёра надвигания; 6 — постав дисковых пил [рисунок авторов]

Figure 5. The layout of the coordinate system for technological movements of the object of labor: 1 — transverse conveyor, 2 — inclined surface A — B; 3 — longitudinal conveyor; 4 — slasher table; 5 — thrust transverse conveyor stops; 6 — supply of circular saws

Запишем структурную формулу поточной линии, состоящую из четырёх последовательных установок различного типа оборудования, которые совершают следующие операции (см. рисунок 5):

- разобшение пакета хлыстов и подача на наклонную поверхность А — В на расстояние l_1 ;
- скольжение (скатывание) по плоской поверхности А — В и изменение координат по оси Y — l_2 , по оси X — l_3 ;
- перемещение (ориентация) продольным транспортёром на расстояние l_4 ;
- надвигание на дисковые пилы б упорами 5 слешера с расстоянием между упорами l_5 .

Последовательность технологических перемещений в виде структурной формулы (модели) запишем следующим образом (сокращённая запись матриц 4×4) [29], [30]:

$$M_5 = m_1(\vec{i}, l_1) \times m_2(\vec{j}, l_2) \times m_3(\vec{i}, l_3) \times m_4(\vec{k}, l_4) \times m_5(\vec{i}, l_5), \quad (8)$$

где M_5 — произведение переходных матриц m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 , индекс указывает на количество агрегатов.

$$M_5 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_3 + l_5 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

В структурных формулах (8), (9) скольжение (скатывание) по поверхности А — В для упрощения расчётов заменено на изменение координат по оси Y — l_2 , по оси X — l_3 . Эта возможность вытекает из геометрической трактовки преобразования координат при помощи переходных диагональных квадратных матриц 4×4 , которая в конечном итоге определяет координаты предмета труда относительно базовой (старой) системы координат. То есть вместо описания поверхности А — В мы произвели изменение координат по осям Y, X на величины l_2, l_3 соответственно, что значительно упрощает запись в аналитическом виде операции скатывания предмета труда.

Базовая матрица ноль-вектора $m_0(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0)$ в записях (8), (9) условно не показана для упрощения, но всегда присутствует по умолчанию. После перемножения матриц (9) имеем:

$$M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_3 + l_5 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

По результирующей матрице (10) строим графическое соответствие матрице (10) с координатами $x = l_1 + l_3 + l_5, y = l_2, z = l_4$, соблюдая правило сложения векторов.

По рисунку 5 последовательно складывая векторы $R = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5$, имеем векторную сумму.

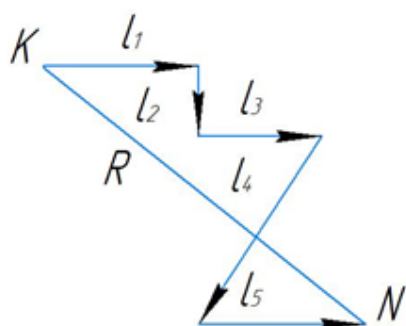


Рисунок 6. Векторная сумма: l_1 — вектор выдачи древесных хлыстов, направление вектора вдоль оси X (по направляющему вектору \vec{i}), l_2 — вектор изменения по оси Y (направление вектора по направляющему вектору \vec{j}); l_3 — вектор изменения по оси X (направление вектора по направляющему вектору \vec{i}); l_4 — вектор изменения координаты по направлению единичного вектора \vec{k} (ориентирующий транспортёр, ось Z); l_5 — вектор изменения координаты упора надвигания (по направляющему вектору \vec{i}) [рисунок авторов]

Figure 6. Vector sum: l_1 is the vector of tree length stems outfeeding, the direction of the vector along the X-axis (along the guiding vector \vec{i}), l_2 is the vector of change along the Y-axis (direction of the vector along the guiding vector \vec{j}); l_3 is the vector of change along the X-axis (direction of the vector along the guiding vector \vec{i}); l_4 is the vector of the coordinate change in the direction of the unit vector \vec{k} (orientation conveyor, Z axis); l_5 is the vector of the change in the coordinate of the thrust stop (along the guiding vector \vec{i})

Координаты радиус-вектора R : $x = l_1 + l_3 + l_5$, $y = l_2$, $l_2z = l_4$ в старой системе координат.

По рисунку 6 запишем векторное уравнение

$$R = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5. \quad (11)$$

Сравним уравнение (11) с расчётной схемой (рисунок 5). Сравнение показывает, что преобразование координат совпадает с векторным уравнением (11) по содержанию и направленности векторов переходных матриц.

Для дискретно-непрерывных поточных линий создадим идеальную модель. Необходимым условием для идеальной модели непрерывного действия является выбор станка (агрегата), задающего ритм обработки предмета труда $t_{ц}$ и равенство циклов обработки и выдачи.

Для линий с поперечной подачей древесных хлыстов «генератором» ритмичности является слешер, имеющий поперечный транспортёр надвигания с жёсткой связью между упорами надвигания посредством цепей. Расстояние между упорами $l_{уп}$, м. Скорость надвигания цепей $v_{уп}$, м/с. Для ведущего (генератора) оборудования с неизвестным

значением $t_{ц}$ цикл рассчитывается по известным формулам определения производительности для линий непрерывного или циклического действия. Например, для слешерных линий [26]:

$$P_{ч} = 3600 \varphi_1 \varphi_2 \bar{V} k/t_{ц}, \quad (12)$$

где $P_{ч}$ — задаваемая часовая производительность, м³/ч; φ_1, φ_2 — коэффициенты использования рабочего времени и технической готовности соответственно; \bar{V} — средний объём древесного хлыста, м³; k — коэффициент заполнения упоров (равен отношению заполненных упоров к общему количеству упоров, прошедших от точки отсчёта за определённый промежуток времени). Для идеальной линии $k=1$; $t_{ц} = l_{уп}/v_{уп}$ — время цикла, с.

Рекомендуемый заводской коэффициент заполнения упоров для расчётов $k=0,8$. Коэффициент заполнения упоров — универсальный критерий, который определяет функциональные возможности околостаночного оборудования. Обычно коэффициент заполнения упоров получают экспериментальным путём; путь эффективный, но очень затратный. Наличие адекватного и недорогого моделирования намного эффективней экономически. Рассмотрим векторное уравнение (11) с точки зрения взаимосвязанности элементов уравнения (11) через общий критерий. Таким критерием является цикл обработки $t_{ц}$ $t_{ц}$ единицы предмета труда; для этого выразим перемещения через скорость V_i и $t_{ц}$ $t_{ц}$ (время цикла), т. е. разделим уравнение (11) на время цикла. При этом получим новое векторное уравнение:

$$\bar{V}_1 t_{ц} + \bar{V}_2 t_{ц} + \bar{V}_3 t_{ц} + \bar{V}_4 t_{ц} + \bar{V}_5 t_{ц} = \bar{V}_R \times t_{ц}, \quad (13)$$

Уравнение (13) отображает векторные перемещения с расчётными векторами скоростей. Рисунок 6 (в виде векторной суммы) графически отображает перемещения последовательно по всем агрегатам, что соответствует дискретно-циклическому процессу обработки на поточной линии. Равнодействующее виртуальное перемещение $|R| = |V_R| \cdot t_{ц}$ происходит со скоростью $|V_R|$ из точки K в точку N за время $t_{ц}$ $t_{ц}$ для дискретно-циклического технологического процесса (см. рисунок 6).

Это объяснение касается правой части уравнения (13). Если процесс непрерывный, то левая часть описывает перемещения по векторам за время $t_{ц}$ $t_{ц}$, т. е. каждое перемещение на расстояния l_i будет происходить за время $t_{ц}$ $t_{ц}$, что обеспечивает поточной линии идеальные условия работы. Это условие не решается данным векторным уравнением, но скорости перемещений определяются.

То есть уравнение (13) не позволяет описать континуальность процесса, поскольку непрерывный процесс характеризуется плавающей системой координат, которая обеспечивает наличие на каждом виде оборудования, составляющего поточную линию, $(n - 1)$ предмет труда. Таким образом, для идеальной линии непрерывного типа каждый вид оборудования обрабатывает предмет труда за время $t_{ц}$, $t_{ц}$, равное циклу задающего ритм оборудования, в нашем случае — слешерной установки. Данное положение обеспечивает графическое моделирование с возможностью проведения моделирования с вариацией факторов, как с

комплекс-ной оценкой (многофакторный эксперимент), так и с однофакторной вариацией стохастического воздействия.

Для дискретно-циклического процесса правая часть имеет такое же объяснение, как сделанное выше. Левая часть трактуется иначе: перемещения предмета труда $|L_1|, |L_2|, |L_3|, |L_4|, |L_5|$ совершаются со скоростями $|V_1|, |V_2|, |V_3|, |V_4|, |V_5|$ последовательно, которые обеспечат суммарное время прохождения

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = t_{ц}, \quad (14)$$

для дискретно-циклического процесса загрузка первого агрегата произойдёт только тогда, когда освободится пятый агрегат — станок (см. рисунок 5).

Для дискретно-непрерывного процесса загрузка первого агрегата начинается в момент окончания обработки предыдущего предмета труда.

Таким образом, в изложенном выше материале представлен метод моделирования технологического процесса в формате 3D, т. е. применены квадратные переходные матрицы 4×4 , которые представляют четырёхмерное пространство (три координатных оси — X, Y, Z, четвёртой координате присвоено численное значение — единица).

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

При помощи матриц 4×4 определяются скорости перемещений, проводится структурный анализ по технологическим возможностям множества однотипного оборудования, определяются варианты дискретно-непрерывного (континуального) моделирования.

3. Результаты

Следующий этап применения метода матричных преобразований координат (МПК) представляет собой применение переходных матриц 5×5 (пятимерное измерение) с введением независимого параметра — времени T , с.

Матрица переходная, квадратная, диагональная, представлена ниже выражением (16):

$$m = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Матрица 5×5 последний столбец, первые три элемента — координаты предмета труда x , y , z , в старой координатной системе OXYZ. Четвёртый элемент пятого столбца есть независимый параметр — время t [28].

Произведём описание более простой поточной системы (амурский слешер), состоящей из трёх видов оборудования, которые выполняют следующие операции: A — разобшение пакета древесных хлыстов; B — продольная ориентация; C — надвигание древесных хлыстов на постав пил.

Структуру опишем графом, A, B, C — вершины графа (рисунок 7), l_1, l_2, l_3 — рёбра графа, D — операция складирования.

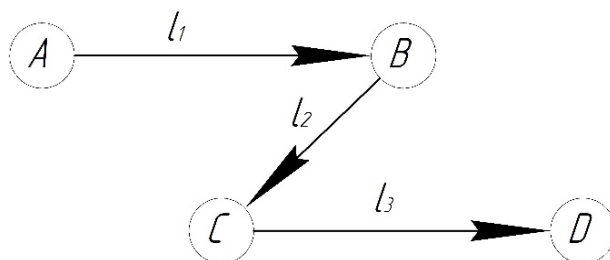


Рисунок 7. Граф технологического потока [рисунок авторов]

Figure 7. Graph of technological flow

В соответствии с рисунком 8 напомним структурную формулу технологического процесса последовательно взаимодействующих агрегатов в сокращённой и развёрнутой записях матриц 5×5 :

$$M_3 = m_1(\vec{i}, t; l_1, t_1) \times m_2(\vec{k}, t; l_2, t_2) \times m_3(\vec{i}, t; l_3, t_3) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (17)$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 + l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 + t_2 + t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

где M_3 M_3 — матрица описывает структуру поточной линии, состоящую из трёх последовательно установленных агрегатов (станков). Первому станку соответствует матрица m_1 m_1 с направлением перемещения по единичному вектору \vec{i} на расстояние l_1 l_1 за время t_1 t_1 , вторая матрица m_2 m_2 соответствует второму станку в технологической последовательности в направлении вектора \vec{k} на расстояние l_2 l_2 за время t_2 t_2 , матрица m_3 m_3 соответствует третьему станку по единичному вектору \vec{i} на расстояние l_3 l_3 за время t_3 t_3 , более кратко: матрица m_1 $m_1(\vec{i})$ — вектор направления, t указывает на процесс во времени, l_2 — расстояние перемещения, t_1 — время перемещения. Наличие в сокращённой записи (17)

знака t и обозначения 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 .

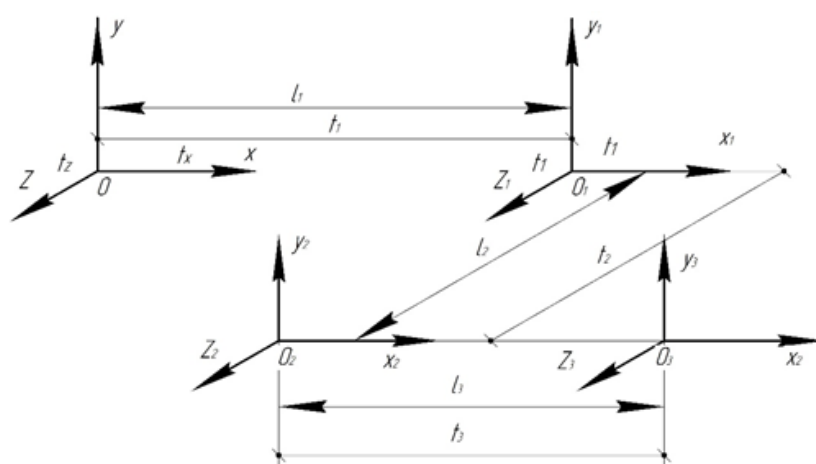


Рисунок 8. Матричные преобразования координат: OXYZ — базовая система координат (старая система) присваивается предмету труда, поступившему на операцию разобщения пакета; $O_1 X_1 Y_1 Z_1, O_2 X_2 Y_2 Z_2, O_3 X_3 Y_3 Z_3$ — координатные системы, соответствующие операциям разобщения, подачи на ориентацию, надвигания на стационарные дисковые пилы соответственно [рисунок авторов]

Figure 8. Matrix transformations of coordinates. OXYZ — the basic coordinate system (the old system) is assigned to the object of labor received for the package separation operation; $O_1 X_1 Y_1 Z_1, O_2 X_2 Y_2 Z_2, O_3 X_3 Y_3 Z_3$ — are coordinate systems corresponding to the separation operations, orientation feed, and sliding on stationary circular saws, respectively

Проанализируем выражение (17) (развёрнутая часть) — результирующая матрица содержит в пятом столбце координаты радиус-вектора $x = \vec{l}_1 + \vec{l}_2; y = 0; z = l_2$, а также сумму частных отрезков времени, затраченного на выполнение трёх операций (t_1, t_2, t_3). Результирующая матрица подтверждает наличие суммы частных значений времени и конечные координаты предмета труда после обработки. Сокращённая запись или развёрнутая запись переходных матриц представляет последовательность переходов при обработке на станках. Но каждая матрица 5×5 имеет графическую интерпретацию в виде графиков зависимости перемещений от времени. Последовательность таких графиков неразрывно связана с осью времени, данная связь обеспечивает континуальность технологического процесса. Выражение (17), как в свёрнутом, так и в развёрнутом виде, представляет собой основу континуальной модели (структуры) технологического процесса выполнения операций на трёх станках.

Ранее установили, что каждый хлыст проходит обработку последовательно, через все станки. Непрерывный поток организуется, если хлыст поступает на первый станок сразу при его освобождении (см. рисунок 5). Циклический принцип осуществляется только тогда, когда освободится последний станок. Четвёртый элемент пятого столбца матрицы 5×5 представляет собой общую ось времени T , которая начинается с нулевого значения при поступлении на обработку первого предмета труда, представляет собой непрерывную череду повторяющейся суммы частных циклов обработки $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3$ и закончится при прекращении графической реализации технологического процесса.

Рассмотрим первую матрицу выражения (17) (развёрнутая запись).

Перемещения совершаются по векторам, соединяющим начальные точки координатных систем O_i .

Повернём координатную систему (рисунок 9) вокруг координатной оси Z на 90° . Получим вектор l_1 \vec{l}_1 и ось X на месте оси Y . Перенесём вектор l_1 \vec{l}_1 с началом координат вправо и получим график зависимости перемещения от времени T (рисунок 10) в плоскости XOY .

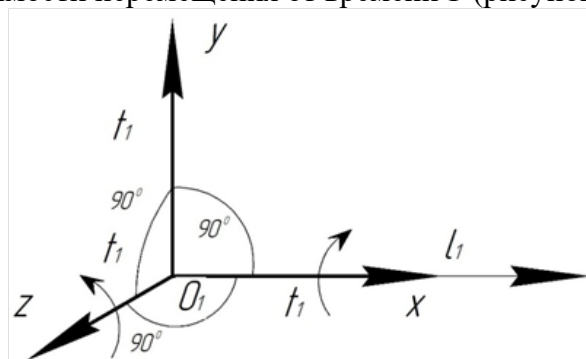


Рисунок 9. Графическое соответствие матрицы 5×5 [рисунок авторов]

Figure 9. Graphical correspondence of the 5×5 matrix

В таком же порядке осуществляется поворот вокруг оси X (рисунок 11)

Следует отметить, что системы координат однородные для векторов перемещений, т. е. все координатные оси имеют одинаковый масштаб, правило знаков при повороте вокруг какой-либо оси не соблюдаем, поскольку вычислений с применением матриц не производим. Соблюдаем правило однородности как для перемещений, так и для времени t . При всех действиях с графиками время не может быть отрицательным.

Для перемещений по направлению единичного вектора j (ось Y) поворота вокруг оси не требуется. В примере по рисунку 8 отсутствуют перемещения в вертикальной плоскости XOY . Схема преобразования координатной системы $OXYZ$ в график зависимости пути от времени $l = f(t)$ (рисунок 12).

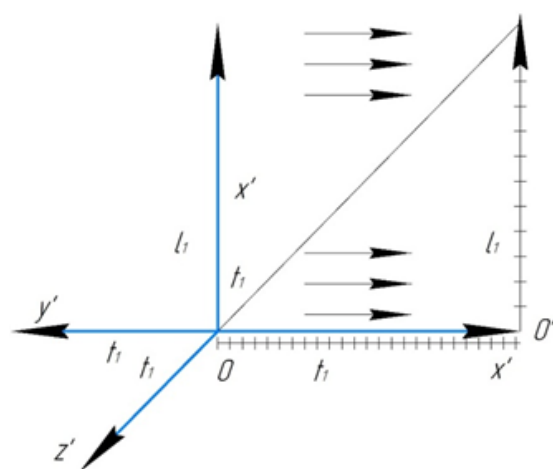


Рисунок 10. Схема замещения оси Y осью X с вектором l_1 при повороте координатной системы вокруг оси Z на 90° для получения графика $l = f(t)$ [рисунок авторов]

Figure 10. Scheme of replacing the Y axis with the X axis with the vector l_1 when rotating the coordinate system around the Z axis by 90° to obtain the graph $l = f(t)$

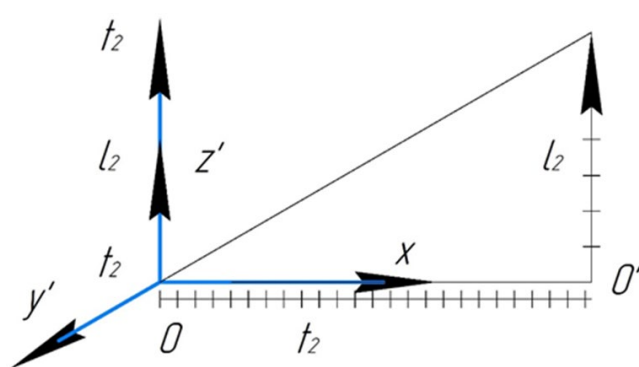


Рисунок 11. Схема замещения оси Z при повороте вокруг оси X на 90° для получения графика $l = f(t)$ [рисунок авторов]

Figure 11. Scheme of substitution of the Z axis when rotating around the X axis by 90° to obtain the graph $l = f(t)$

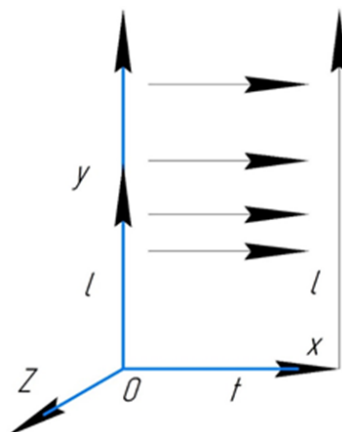


Рисунок 12. Схема преобразования координатной системы в функцию $l = f(t)$
[рисунок авторов]

Figure 12. Scheme of transformation of the coordinate system into the function $l = f(t)$

Таким образом, реализована графическая составляющая структуры технологического процесса (17). Результирующая матрица четвёртой матрицы выражения (17) необходима для подтверждения нашей гипотезы о непрерывности оси времени при технологическом процессе, т. е. $t_1 + t_2 + t_3$.

4. Обсуждение и заключение

Разработанные в статье предложения конкретизируют метод использования матриц 4×4 в смысле получения модели 2D формата дискретно-циклического и дискретно-непрерывного типа в графическом отображении процесса в виде матричной суммы. При этом рассмотрены главные недостатки двумерной модели. Далее продолжено развитие двумерного моделирования с использованием метода МПК (ортогональные диагональные единичные матрицы 4×4) в графоаналитической интерпретации континуального технологического процесса. Приведён пример континуальной модели идеальной дискретно-непрерывной поточной линии с последовательным расположением исполнительного оборудования в количестве более двух. Кратко изложены возможности метода МПК.

В заключительной части представлен фрагмент континуальной модели трёхстаночной идеальной поточной линии. Выше изложена структура континуальной модели поточной линии с последовательно установленным оборудованием. Основой технологических операций являются перемещения предметов труда. Идеальность определяется отсутствием задержек и простоев. Последний (третий) станок имеет жёсткую (посредством цепей транспортёра) связь между упорами слешерного стола, что позволяет вынести график перемещений l_3 в одну последовательность (верхняя строка).

Горизонтальные оси времени идентичны. Каждый горизонтальный ряд соответствует обработке одного предмета труда на трёх агрегатах. Идеальность линии достигнута за счёт

равенства частных t_i циклов: $t_1 = t_2 = t_3 = 8$ с. Общее время выполнения операции T , равно 50 с (вертикальное сечение 50 с), т. е. за 50 с обработано 5 хлыстов. Время цикла по общей оси времени: время по общей оси времени $T = 50$ с, n — количество хлыстов, обработанных станком $n = 6$. Цикл обработки одного хлыста $T_{ц}$ равен 10 с. В идеале $T_{ц}$ должен равняться 8 с, но при начале работы 1 хлыст имеет затрату времени $t_1 = 8$ с без совмещения операций. Это время распределяется на каждый i -й хлыст в $\Delta t_i = \frac{8c}{n} = 1,6c$.

При $n = 100$ шт. $\Delta t_i = 0,08c$ и т. д.

Переходные матрицы выражения (17) имеют графическую интерпретацию в виде радиус-вектора, исходящего из начала координат. Ось времени также исходит из начала координат и для данного векторного перехода располагается на каждой координатной оси (см. рисунок 8).

Как отмечалось ранее, в практике моделирования технологических процессов наиболее распространённым методом моделирования является циклограммный, который основывается на отображении в графическом виде преимущественно параметра — времени $t_{ц}$ $t_{ц}$ и [27] безразмерного, чаще всего количественного, параметра, т. е. модель в формате 2D.

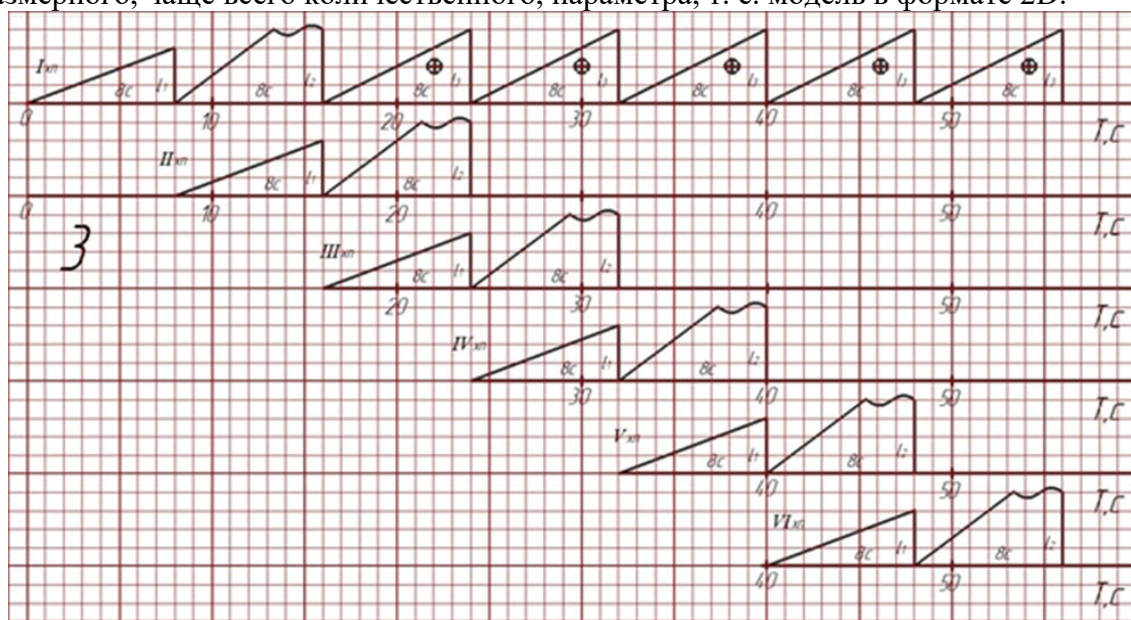


Рисунок 13. Фрагмент континуальной идеальной модели. По составу операций соответствует рисункам 7 и 8 [рисунок авторов]

Figure 13. Fragment of a continuum ideal model. The composition of the operations corresponds to figures 7 and 8

Метод МПК в графическом виде отображает перемещения по направлению трёх координатных осей (x , y , z) и частное время перемещений t_i по каждой операции, которые суммируются и отображаются в виде общей оси времени T , с, что соответствует формату 4D, т. е. учитываются три параметра перемещений в виде графиков зависимости перемещений

от времени, параметр в виде частных значений времени, затраченного на обработку хлыстов, плюс параметр скорости V . При этом все параметры возможно корректировать в любое время проведения вычислительного эксперимента 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, включённого в поточную линию.

Список литературы

1. Технология и оборудование лесных складов и лесообрабатывающих цехов: Учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 656300 «Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств» по специальности 250401 «Лесоинженерное дело» / В. И. Патякин, А. К. Редькин, С. М. Базаров [и др.]. М.: Изд-во Москов. гос. ун-та леса, 2008. 384 с.
2. Куницкая О. А., Григорьев И. В. Новые материалы из низкотоварной древесины и изделия из них // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 4-3 (9-3). С. 22—26.
3. Куницкая О. А., Локищанов Б. М., Григорьев И. В. Переработка низкотоварной древесины на технологическую щепу // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-2 (8-2). С. 379—382.
4. Куницкая О. А., Григорьев И. В. Перспективы увеличения объёмов лесозаготовки за счёт низкотоварной древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 3-2 (8-2). С. 104—107.
5. Григорьев И. В., Кацадзе В. А. Стратегия развития лесного машиностроения в России // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 209—212.
6. Григорьев И. В. Современные проблемы импортозамещения в лесном машиностроении Российской Федерации // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. научно-практич. конф. / Отв. ред.: Ю. А. Безруких, Е. В. Мельникова. Красноярск, 2022. С. 165—169.
7. Григорьев И. В., Кацадзе В. А. Состояние и перспективы развития лесного машиностроения в России // Инновации в промышленности и социальной сфере: Материалы республикан. научно-практич. конф. Петрозаводск, 2015. С. 27—30.
8. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: Improving the efficiency of wood chipping operations / I. Grigorev, A. Shadrin, S. Katkov [et al.] // International Wood Products Journal. 2021. Vol. 12, no. 2. P. 128—134.
9. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology / I. Grigorev, A. Shadrin, S. Katkov [et al.] // Journal of Forest Science. 2021. Vol. 67, no. 5. P. 212—218.
10. Improving the efficiency of wood chipping operations / I. Grigorev, A. Shadrin, N. Kostyukevich [et al.] // INMATEH — Agricultural Engineering. 2020. Vol. 61, no. 2. P. 217—224.
11. Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking / I. V. Grigorev, O. N. Leonova, V. A. Kalyashov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Series: International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies. 2020. P. 012021.

12. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / Р. В. Воронов, О. Б. Марков, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125—134.
13. Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Гулько А. Е. Математическая модель групповой окорки лесоматериалов в окорочных барабанах // Научное обозрение. 2012. № 4. С. 154—171.
14. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / О. Б. Марков, Р. В. Воронов, А. Б. Давтян [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 16—26.
15. Математическая модель определения эффективности доставки сил и средств пожаротушения с учётом уровня развития транспортной сети на территории лесного фонда / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 57—62.
16. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин: Учебник для втузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 640 с.
17. Сердюк А. И., Рахматуллин Р. Р., Зеленин А. П. Метод циклограмм в исследовании гибких производственных ячеек. Модели и алгоритмы. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. 208 с.
18. Редькин А. К. Математическое моделирование и системный анализ лесоскладских операций. М.: МЛТИ, 1985. 127 с.
19. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the north-west of Russia / O. I. Grigorieva, E. M. Runova, E. A. Tikhonov [et al.] // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Vol. 31, no. 5. P. 4107—4115.
20. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests / O. Grigorieva, E. Runova, V. Ivanov [et al.] // Journal of Forestry Research. 2022. Vol. 33, no. 4. P. 1145—1156.
21. Коробецкий Ю. П., Рамазанов С. К. Имитационные модели в гибких системах. Луганск: Изд-во ВНУ, 2003. 280 с.
22. Lozovoy V. A., Litvinov D. Idealization of formalized flow technology model // Osterreichisches Multiscience Journal. Innsbruck, Austria. 2020. Vol. 1, no. 34. P. 72—75.
23. Пигнастый О. М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математика. 2014. С. 3—12.
24. Пигнастый О. М., Заруба В. Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконференция по проблемам управления: Тез. докл. 6-й Всерос. научно-практич. конф. (МКПУ-2013) (Дивноморье, 30 сент. — 5 окт. 2013 г.). Ростов н/Д.: Изд-во Южного федер. ун-та, 2013. Т. 3. С. 157—161.
25. Григорьев И. В., Куницкая Д. Е. Уменьшение количества отходов основного производства древесно-подготовительных цехов за счёт автоматизации основных операций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 409—412.
26. Бирман А. Р., Григорьев И. В., Ильюшенко Д. А. Технология и оборудование лесных складов и лесообрабатывающих цехов. Установки для поперечной распиловки круглых лесоматериалов: Лабораторный практикум для выполнения лабораторных работ и самостоятельных занятий студентов направления подготовки 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств». СПб., 2015. 51 с.
27. Воробьев Е. И., Попов С. А., Шевелева Г. И. Механика промышленных роботов: В 3 кн. Кн. 1: Кинематика и динамика. М.: Высш. шк., 1988. 304 с.
28. Denavit J., Hartenberg R. S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics. 1955. Vol. 22, trans. ASME, vol. 77, series E. P. 215—221.

29. Лозовой В. А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжёвочных линий // Лесозэксплуатация: межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СибГТУ, 1998. С. 133—139.
30. Лозовой В. А., Никончук М. Ю., Литвинов Д. Ю. Концепция моделирования поточных технологий методом матричных преобразований координат // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. XL, № 4. С. 467—475.

References

1. Patyakin V. I., Redkin A. K., Bazarov S. M., Birman A. R., Bit Yu. A., Grigorev I. V., Shadrin A. A., Suitmanov A. N. *Technology and equipment of timber warehouses and woodworking shops: a textbook for university students studying in the field of certified specialists 656300 «Technology of logging and woodworking industries» specialty 250401 «Forest Engineering»*. Moscow, Publishing House Moscow State University of Forests, 2008. 384 p. (In Russ.)
2. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. New materials from low-grade wood and products made from them. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 4-3 (9-3), pp. 22—26. (In Russ.)
3. Kunitskaya O. A., Lokshtanov B. M., Grigorev I. V. Processing of low-grade wood into technological chips. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-2 (8-2), pp. 379—382. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A., Grigorev I. V. Prospects for increasing the volume of forest exploitation due to low-commodity wood. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 3-2 (8-2), pp. 104—107. (In Russ.)
5. Grigorev I. V., Katsadze V. A. Strategy of development of forest engineering in Russia. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-2 (13-2), pp. 209—212. (In Russ.)
6. Grigorev I. V. Modern problems of import substitution in the 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 conference*. Editors: Yu. A. Bezrukikh, E. V. Melnikova. Krasnoyarsk, 2022, pp. 165—169. (In Russ.)
7. Grigorev I. V., Katsadze V. A. The state and prospects of development of forest engineering in Russia. *Innovations in industry and the social sphere: Materials of the Republican scientific and practical conference*. Petrozavodsk, 2015, pp. 27—30. (In Russ.)
8. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Gnatovskaya I., Diev R., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Akinin D. Russian sawmill modernization (a case study). Part 2: improving the efficiency of wood chipping operations. *International Wood Products Journal*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 128—134.
9. Grigorev I., Shadrin A., Katkov S., Borisov V., Kaznacheeva N., Levushkin D., Druzyanova V., Gnatovskaya I., Diev R., Akinin D. Improving the quality of sorting wood chips by scanning and machine vision technology. *Journal of Forest Science*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 212—218.
10. Grigorev I., Shadrin A., Kostyukevich N., Levushkin D., Borisov V., Diev R., Voronova A. Improving the efficiency of wood chipping operations. *INMATEH — Agricultural Engineering*, 2020, vol. 61, no. 2, pp. 217—224.
11. Grigorev I. V., Leonova O. N., Kalyashov V. A., Shvetsova V. V. Creation and experimental verification of a mathematical model of industrial debarking. *Journal of Physics: Conference Series. Series: International Conference on Future of Engineering Systems and Technologies*, 2020, p. 012021.

12. Voronov R. V., Markov O. B., Grigorev I. V., Davtyan A. B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *News of higher educational institutions. Forest magazine*, 2019, no. 5 (371), pp. 125—134. (In Russ.)
13. Grigorev I. V., Shapiro V. Ya., Gulko A. E. Mathematical model of group logging of timber in leg drums. *Scientific review*, 2012, no. 4, pp. 154—171. (In Russ.)
14. Markov O. B., Voronov R. V., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Kalita G. A. A mathematical model for selecting a system of machines for creating and operating forest plantations. *The wood-working industry*, 2021, no. 1, pp. 16—26. (In Russ.)
15. Kovalev R. N., Enaleeva-Bandura I. M., Baranov A. N., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. A mathematical model for determining the effectiveness of the delivery of fire extinguishing forces and means, taking into account the level of development of the transport network in the territory of the forest fund. *Systems. Methods. Technologies*, 2021, no. 4 (52), pp. 57—62. (In Russ.)
16. Artobolevsky I. I. *Theory of mechanisms and machines: Textbook for higher education institutions*. 4th ed., revised and add. Moscow, Science, Gl. ed. fiz.-mat. lit., 1988. 640 p. (In Russ.)
17. Serdyuk A. I., Rakhmatullin R. R., Zelenin A. P. *The cyclogram method in the study of flexible production cells. Models and algorithms*. Orenburg, GO OSU, 2009. 208 p. (In Russ.)
18. Redkin A. K. *Mathematical modeling and system analysis of logging operations*. Moscow, MLTI, 1985. 127 p. (In Russ.)
19. Grigorieva O. I., Runova E. M., Tikhonov E. A., Storodubtseva T. N., Druzyanova V. P., Gerts E. F., Garus I. A., Grigorev I. V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the north-west of Russia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 4107—4115.
20. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Savchenkova V., Hertz E., Voronova A., Shvetsova V., Grigorev I., Lavrov M. Comparative analysis of thinning techniques in pine forests. *Journal of Forestry Research*, 2022, vol. 33, no. 4, pp. 1145—1156.
21. Korobetsky Yu. P., Ramazanov S. K. *Simulation models in flexible systems*. Lugansk, VNU Publishing House, 2003. 280 p. (In Russ.)
22. Lozovoy V. A., Litvinov D. Idealization of formalized flow technology model. *Osterreichisches Multiscience Journal*. Innsbruck, Austria, 2020, vol. 1, no. 34, pp. 72—75.
23. Pignastyi O. M. Fundamentals of the statistical theory of constructing continuous models of production lines. *East European Journal of Advanced Technologies. Mathematics*, 2014, pp. 3—12. (In Russ.)
24. Pignastyj O. M., Zaruba V. Ya. Continuous modeling of production on production lines. Multi-conference on management problems: abstracts of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference (MCPU-2013) (Divnomorye, September 30 — October 5, 2013). Rostov-on-Don, Publishing House Southern Federal University, 2013, vol. 3, pp. 157—161. (In Russ.)
25. Grigorev I. V., Kunitskaya D. E. Reduction of the amount of waste from the main production of wood preparation shops due to automation of basic operations. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015, vol. 3, no. 2-2 (13-2), pp. 409—412. (In Russ.)
26. Birman A. R., Grigorev I. V., Ilyushenko D. A. *Technology and equipment of timber warehouses and timber processing workshops. Installations for cross-sawing round timber. Laboratory workshop for performing laboratory work and independent studies for students of the training area 03/35/02 «Technology of logging and wood processing industries»*. Saint Petersburg, 2015. 51 p. (In Russ.)

27. Vorobyov E. I., Popov S. A., Sheveleva G. I. Mechanics of industrial robots: In 3 books. Book 1: Kinematics and dynamics. Moscow, Higher School, 1988. 304 p. (In Russ.)
28. Denavit J., Hartenberg R. S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 1955, vol. 22, trans. ASME, vol. 77, series E, pp. 215—221.
29. Lozovoy V. A. Matrix transformation of coordinates in relation to the structural analysis of bucking lines. *Forest exploitation: interuniversity collection of scientific papers*. Krasnoyarsk, SibGTU, 1998, pp. 133—139. (In Russ.)
30. Lozovoy V. A., Nikonchuk M. Yu., Litvinov D. Yu. The concept of modeling flow technologies by matrix coordinate transformations. *Coniferous Boreal zone*, 2022, vol. XL, no. 4, pp. 467—475. (In Russ.)

© Еналеева-Бандура И. М., Лозовой Д. В., Литвинов Д. Ю.,
Баранов А. Н., Куницкая О. А., Задраускайте Н. О., 2026