УДК 519.8:630*38:519.6:004.942 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-83-90

Матричное моделирование идеализированных поточных линий способом суммирования по времени

И.М. Еналеева – Бандура[1a], Д.В. Лозовой[1b], Д.Ю. Литвинов[1c], А.Н. Баранов[1d], О.А. Куницкая[2e], Е.А. Тихонов[3f]

[1] Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, Россия
[2] Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, Якутск, Россия
[3] Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, Петрозаводск, Россия
[a] melnikov1978@inbox.ru, [b] dvl92@mail.ru, [c] chess96@mail.ru, [d] aleksandr-baranov-55@mail.ru, [e] ola.ola07@mail.ru, [f] tihonov@petrsu.ru.
[a] https://orcid.org/ 0000-0001-7032-9512, [b] https://orcid.org/ 0009-0009-8414-8355,
[c] https://orcid.org/ 0009-0008-8266-4092, [d] https://orcid.org/ 0000-0003-1333-6285,
[e] https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380, [f] https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268.
Статья поступила 29.06.2026, принята 21.09.2026.

Предложен метод формализации технологического процесса с графической реализацией отдельных операций поточных линий на основе матричных преобразований координат (МПК). Изложен метод идеализации технологического процесса поточных линий с последовательным расположением станков в количестве более двух. Данный метод отличается от циклограммного двумерного представления результатов моделирования континуальным четырёхмерным отображением технологического процесса. Первым шагом при моделировании технологического процесса в непрерывном представлении является уточнение или назначение основных параметров оборудования, составляющих поток. Эта задача решается при помощи матриц 4×4. При этом не исключена возможность моделирования инструментального воздействия на предмет труда при наличии затрат времени. Рассмотрены особенности технологий, которые в основном связаны с переместительными операциями предмета труда, что является главной составляющей предлагаемого метода формализации. Предлагаемый метод формализации технологического процесса позволяет на начальной стадии создать «идеальную» модель с высокой степенью синхронизации составляющего оборудования. Исключены задержки и простои любого характера – внешнего или внутреннего. Предложенный метод формализации технологического процесса позволяет проводить моделирование практически с любой детализацией возмущающих факторов. Предлагаемые 3D-, 4D-модели технологического процесса позволяют провести функциональный структурный анализ по составляющим оборудования и предмета труда. Возмущающие факторы в виде перемещений также описываются матричным методом, что делает модель более однородной. При моделировании учитываются возмущающие факторы, в основе которых лежат затраты времени, при этом предмет труда может быть неподвижным, например, случай поперечного пиления на поточных линиях дискретно-циклического действия. Идеальная модель в графическом виде позволяет решать следующие задачи: определять основные параметры поточных линий (скорости, расстояния перемещений, совмещённость операций); моделирование существующих потоков с устранением несоответствия в синхронизации основного оборудования; модель поточной линии позволяет производить эксперименты с неограниченным количеством оборудования без ограничений по времени.

Ключевые слова: матричные преобразования координат; формализация поточных технологий; 4D-моделирование; определение скоростей предмета труда; идеальная модель поточной линии; поток с последовательным размещением оборудования; континуальная модель.

Matrix modeling of idealized production lines by the method of time summation

I.M. Enaleeva-Bandura[1a], D.V. Lozovoy[1b], D.Yu. Litvinov[1c], A.N. Baranov[1d], O.A. Kunitskaya[2e], E.A. Tikhonov[3f]

[1] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia
[2] Arctic State Agrotechnological University; 3 km, Bld. 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Russia
[3] Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia
[a] melnikov1978@inbox.ru, [b] dvl92@mail.ru, [c] chess96@mail.ru, [d] aleksandr-baranov-55@mail.ru, [e] ola.ola07@mail.ru, [f] tihonov@petrsu.ru.
[a] https://orcid.org/ 0000-0001-7032-9512, [b] https://orcid.org/ 0009-0009-8414-8355,
[c] https://orcid.org/ 0009-0008-8266-4092, [d] https://orcid.org/ 0000-0003-1333-6285,
[e] https://orcid.org/ 0000-0001-8542-9380, [f] https://orcid.org/ 0000-0003-2136-3268.
Received 29.06.2026, accepted 21.09.2026.

A method is proposed for formalizing a technological process with graphical representation of individual operations of production lines based on matrix coordinate transformations (MCT). A method for idealizing the technological process of production lines with a sequential arrangement of more than two machines is described. This method differs from the cyclogram two-dimensional representation of the simulation results by a continuous four-dimensional representation of the technological process. The first step in modeling the technological process in a continuous representation is to clarify or assign the main parameters of the equipment that make up the flow. This problem is solved using 4×4 matrices. At the same time, the possibility of modeling the instrumental impact on the subject of labor in the presence of time costs is not excluded. The special features of technologies that are mainly related to the movement operations of the object of labor, which is the main component of the proposed method of formalization, are considered. The proposed method of formalization of the technological process makes it possible at the initial stage to create an «ideal» model with a high degree of synchronization of the component equipment. Delays and downtime of any kind (external or internal) are excluded. The proposed method of formalization of the technological process allows modeling with almost any detail of disturbing factors. The proposed 3D and 4D models of the technological process allow for a functional structural analysis of the components of the equipment and the object of labor. The disturbing factors in the form of displacements are also described using the matrix method, which makes the model more homogeneous. When modeling, disturbing factors are taken into account, which are based on time costs, while the object of labor may not be mobile, for example, the case of cross sawing on production lines of discrete cyclic action. The ideal model in graphical form allows one to solve the following tasks: to determine the main parameters of production lines (speeds, travel distances, combination of operations); modeling of existing flows with the elimination of inconsistencies in the synchronization of the main equipment; the production line model allows experiments with an unlimited number of equipment without time limits.

Keywords: matrix coordinate transformations; formalization of production-line technologies; 4D modeling; determination of speeds of the object of labor; ideal model of a production line; flow with sequential arrangement of equipment; continual model.

Введение. Размерно-качественные характеристики древесного сырья в основном формируются в зависимости от природно-климатических условий и частично при первичной обработке [1–4]. С момента повала дерева до сортировки сортиментов, древесное сырье проходит различные технологические фазы, которые в той или иной мере влияют на размерные характеристики (длина ствола, вершины), возможные механические повреждения [5]. Но размерно-качественные характеристики, заложенные природой, остаются неизменными (диаметр комля, диаметр вершинной части, сбежистость) как и различные пороки (кривизна, наплывы и др.). При всех типах технологического процесса первичной обработки древесного сырья (вывозка хлыстами, вывозка сортиментами) ключевой фазой является раскряжёвка. На этой фазе производства совершаются необратимые изменения предмета труда, закладываются основные качественные характеристики продукта труда первичной переработки сырья, определяется назначение бревен [6, 7]. Основной чертой всех операций являются перемещения предмета труда [2].

При стремительно развивающейся цифровой автоматизации и информатизации во всех отраслях промышленного производства, исполнительное оборудование требует основательной реконструкции или полной замены устаревшего оборудования на новое. Давно назрела необходимость в создании нового поколения поточного высоко производительного оборудования для первичной обработки древесного сырья, как для получения круглых лесоматериалов, так и для производства продукции лесопиления на поточных линиях с широким варьированием производительности и управления качеством производимого продукта [8]. Создание методов моделирования и принципов построения поточных технологий напрямую зависят от предмета труда и его характеристик.

При более подробном рассмотрении фаз технологического процесса лесозаготовок можно определить, что характерной особенностью всех типов технологий первичной обработки древесного сырья являются технологические операции, в основе которых лежат инструментальные воздействия на предмет труда с затратами времени [9].

Для лесосечных работ характерны пространственные перемещения предмета труда. Почти на всех фазах заготовки лесосечное оборудование имеет гидроманипуляторы (ГМ), которые имеют три–пять степеней свободы. Несмотря на достаточную степень подвижности, например, для валочной машины типа ЛП-19, при валке возможны косорезы, сколы, отрывы, поломка ствола и т. п. [10–12]. Приобретённые пороки в дальнейшем отражаются на основных технологических операциях в виде задержек, простоев или требуют установки дополнительного оборудования. Единичное перемещение предмета труда осуществляется при валке, грузятся древесные стволы поштучно или пакетом. Обрезка сучьев преимущественно индивидуальная [13]. Погрузка, вывозка, разгрузка хлыстов, деревьев, брёвен осуществляется пакетами. Величина пакета при погрузке зависит от грузоподъёмности погрузочного механизма [14]. То есть можно считать, что одиночные хлысты и пакеты хлыстов участвуют в технологических операциях в равных пропорциях.

Лесокладские работы также характеризуются наличием превалирующей операции – перемещением предмета труда. Операции на основе перемещений присущи линиям с продольной и поперечной подачей на раскряжёвку: разобщение пакетов хлыстов, раскряжёвка, сортировка круглых лесоматериалов, складирование, подача на переработку [2].

Раскряжёвка может осуществляться мобильными процессорами в сочетании с обрезкой сучьев или стационарными однопильными или многопильными раскряжёвочными установками [15].

При этом практически всегда система оборудования склонна к поточности выполнения операций включая многооперационные комплексы на базе отдельных механизмов (машин). При анализе можно выделить специализированные поточные линии дискретнонепрерывного действия для раскряжёвки древесных хлыстов и линии с дискретно-циклическим принципом выполнения операций.

О.М. Пигнастый предлагает классифицировать модели поточных линий следующим образом – аналитиче

ские, аналитико-численные и имитационные [16]. Аналитические модели подразделяются на дискретно-событийные, дискретно-потоковые и континуальные. При этом выделяется актуальность моделирования поточных технологий с разным уровнем сложности потока и стоимости моделирования.

Сложность моделирования последовательно установленных агрегатов (оборудования) отмечаются, например, в работах [16, 17]. Наличие в потоке более двух последовательно установленных станков (агрегатов, установок) не решается вышеперечисленными методами. Актуальность проблемы настолько высока, что ведущие мировые предприятия (Intel Corporation, Volkswagen AG, Royal Philips) наряду с финансированием многочисленных научных грантов, создали экспериментальные лаборатории по исследованию переходных неустановившихся режимов. Современному производству необходимы надёжные, не требующие значительных вычислительных ресурсов, многомоментные модели, позволяющие описать поведение потоковых параметров производственных линий, как для квазистатических, так и для переходных режимов [16].

Поточные линии в лесопромышленном комплексе требуют особого внимания, поскольку предмет труда очень разнообразен регионально и статистически по своим размерно-качественным характеристикам. Это предъявляет свои требования к исследователям и проектировщикам нового оборудования [18].

При создании поточных линий естественным желанием проектировщика и изготовителя оборудования является получение максимума сведений о стохастических воздействиях на изделие с целью определения достоверной производительности и качества продукции. Эти сведения получаются при исследованиях законов распределения случайных величин воздействия, которые и составляют комплекс стохастических факторов. К таким факторам относятся: внешние, внутренние системные, воздействие извне на систему и, главное, взаимодействие физико-механических и размерно-качественных характеристик предмета труда с оборудованием [17].

Авторами разработан метод моделирования технологических процессов, в основе которых лежат перемещения предмета труда в непрерывном или непрерывно-циклических режимах. Основой метода моделирования являются матричные преобразования координат (МПК) [19, 20].

При создании модели поточной системы предлагается на начальном этапе создать формализованную модель на основе квадратных единичных ортогональных матриц 4×4 с определением и уточнением основных параметров. Затем создать графическую модель «идеальной линии» с определёнными скоростями перемещений предмета труда по заданным векторам, с заданными циклами в двумерном формате циклограмм. Но такая модель малоинформативна. Поэтому создается «идеальная модель» на основе матриц 5×5, что позволяет проводить графоаналитическое моделирование в формате 4D, с учётом возможных значимых случайных или системных факторов (проведение экспериментальных исследований на модели).

Цель работы: в настоящей работе сделана попытка обоснования метода формализации технологического процесса, позволяющего на начальной стадии проектирования создать «идеальную» модель с высокой степенью синхронизации составляющего оборудования.

Материалы и методы исследования. В качестве примера поточной линии с последовательным расположением оборудования принята многопильная линия непрерывного действия с поперечным надвиганием хлыстов на постав круглых дисковых пил (рис. 1).

На рис. 1 представлено схематическое изображение поточной раскряжёвочной линии непрерывного действия с расставленными координатными системами, которые условно совмещены, например, с центрами комлевых срезов хлыстов. Представленная линия совершает следующие операции (рис. 1): разобщает хлысты в разобщителе и подаёт на шнековый ориентирующий транспортёр при помощи сбрасывателя *1*, при этом перемещение по траектории заменено изменением координат по радиусам r', r''; ориентирует хлысты при помощи шнекового ориентирующего транспортёра *2* по одной из пил многопильной установки *4*, перемещение ориентации производится по векторам $S_{пр}$, $S_{поп}$ одновременно; сбрасывает или передерживает хлыст при помощи сбрасывателя *3* на транспортёр надвигания S_3 многопильной установки *4*, которая производит поперечное надвигание древесного хлыста на комплект дисковых пил *5*, перемещение по траектории заменено изменением координат по радиусам r-r; r_1–r_1.

Описание технологического процесса в матричном представлении (аналитическое описание структуры) произведём при помощи переходных матриц 4×4 [20] (1). В этом выражении по умолчанию все матрицы являются матрицами сдвига [16, 20]. Переходные матрицы в выражении (1) записаны в сокращённой матричной записи [19]:

$$M_4=B_1(\vec{j}, r)B_1(\vec{k}, r)B_2(\vec{i}, S_{пр})B_2(\vec{k}, S_{поп})B_3(\vec{k}, r_1)B_3(\vec{j}, r_1)B_4(\vec{k}, S_3), \quad (1)$$

где M_4 – результирующая матрица от перемножения матриц сдвига (индекс нижний обозначает количество агрегатов в потоке); B_1, B_2, B_3, B_4 – переходные единичные ортогональные матрицы преобразования координат (по умолчанию матрицы сдвига); r-r; r_1–r_1 – радиусы перемещения начала координат систем $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ при осуществлении технологических операций с поворотом на угол θ ,θ_1 соответственно; $S_{пр}$, $S_{поп}$ – перемещения начала координат системы $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ по вектору Z_0 с изменением одновременно двух координат – z, x; $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – направляющие единичные векторы, обеспечивающих ортогональность координатных систем.

На рис. 1 в координатных системах условно упущены обозначения начала координат O_0–O_4 для исключения лишнего затемнения рисунка.

Для определения скоростей перемещения предмета труда для идеальной линии создаются векторные уравнения.

Особенности составления структурной формализации для линий со шнековыми ориентирующими транс-

портёрами заключаются в том, что перемещения предмета труда на шнековом транспортёре осуществляются по двум координатам одновременно (рис. 1). Эта же особенность присуща сбрасывателю – отсекателю (рис. 1, поз. 3) – изменение координат x, y также происходит одновременно. При формализации эти особенности не вызывают затруднений ни в одном из указанных случаев, поскольку нас всегда интересуют конечные значения координат. А они равны суммам векторов r', r'', $S_{пр}$, $S_{поп}$. При этом перемещение по траектории заменяется в выражении (1) суммой (первый, второй, пятый и шестой члены выражения (1)).

Следует отметить, что на указанной структуре (рис. 1) поточной линии дискретно-непрерывного типа одномоментно на каждом агрегате размещены разные хлысты (предмет труда условно не показан). При этом известно, что на каждом агрегате размещён один предмет труда. В противном случае проводится моделирование и определяется количество предметов труда на агрегатах. Для шнекового ориентирующего устройства на шнековом поле должен быть один предмет труда.

В лесной отрасли традиционно сложилось, что поточная линия имеет ведущий механизм (станок). В вышеприведённом случае ведущим является многопильный станок *5*, который имеет время цикла надвигания $T_ц$,с., и при ритмичной работе обеспечивает получение заданной производительности.

При рассмотрении структурной формулы технологического процесса (1) или структурной схемы (рис. 1) видно, что все перемещения предмета труда происходят по известным векторам и в итоге представляют собой векторную сумму, которую можно описать векторным уравнением:

$$r+ r +r_1+r_1+ S_{пр} +S_{поп} +S_3 =R, \qquad (2)$$

где R – сумма векторов.

Разделив векторное уравнение (2) на время цикла $T_ц$, с. поточной линии, получим векторное уравнение скоростей, которыми должны обладать станки для выполнения операций по заданной программе, заданным размерам рабочих органов, которые в процессе моделирования можно корректировать, оптимизируя размеры буферных площадок, количество предмета труда на поперечных или продольных транспортёрах и т. д.

Векторное уравнение (2) справедливо для *циклических потоков*, т. е., даёт ответ на вопрос: с какой скоростью предмет труда должен пройти все агрегаты, чтобы сумма затраченного времени на каждом агрегате равнялась заданному циклу выпуска единицы продукции?

При *непрерывном принципе* работы необходимо получить ответ на вопрос: с какой скоростью или за какой отрезок времени должен предмет труда обрабатываться на каждом из n станков (агрегатов), чтобы обеспечить бесперебойный выход продукта за $T_ц$. с (время цикла) ведущего оборудования или станка?

Следующим шагом необходимо создать на основе матриц 5×5 с применением «плавающих» координат [20] структуру поточной линии с непрерывной осью времени, которая обеспечит каждый предмет труда своей индивидуальной последовательностью координатных систем. В свою очередь каждая система в виде матриц 5×5 представляет переместительные операции в виде графиков зависимости перемещений от времени. Общая ось времени объединяет перемещения в строгую последовательность выполнения операций технологического процесса в четырёхмерном формате плюс возможность определения скоростей перемещений предмета труда на каждом из агрегатов. Плавающая система координат обеспечит континуальность процесса и возможность определения степени совмещённости операций и других характеристик поточной линии в графическом виде.

Таким образом, выражение (1) является формализацией технологического момента, равного сумме частных значений времени отдельных операций или циклу обработки данного предмета труда. С учётом разнообразных факторов цикл обработки каждого предмета труда, в общем случае, будет разным. «Плавающая система» координат даёт возможность фиксировать и сопоставлять циклы операций.

Запишем структурную формулу (1) в сокращённой записи матриц 5×5 [21]. Матрицы 5×5 содержат параметр – время t, который в сокращённой записи (2) после обозначения направляющего вектора (i, j, k), указывает на то, что это матрица 5×5. После знака (;) указывается значение параметра расстояния перемещения в виде модуля вектора в принятой единице измерений (метры), затем параметр t в единицах времени (секунды). Если время в каком-либо случае не учитывается, то числовое значение равно нулю.

$$M_4=B_1(\vec{j}, t; r, t1\ )B_1(\vec{k}, t\ ;\ r, 0)B_2(\vec{i},t;S_{пр},t3)B_2(\vec{k},\ t; S_{поп},t4\ )B_3(\vec{k}, t\ ;\ r_1, 0)B_3(\vec{j}, t\ ; r_1,t6)B_4(\vec{k},t; S_3,t7), \qquad (2)$$

где M_4 – результирующая матрица от перемножения матриц сдвига (индекс нижний обозначает количество агрегатов в потоке); B_1, B_2, B_3, B_4 – переходные единичные ортогональные матрицы преобразования координат (по умолчанию матрицы сдвига); r- r; r_1–r_1 – радиусы перемещения начала координат систем O_0 X_0 Y_0 Z_0 , O_1 X_1 Y_1 Z_1 при осуществлении технологических операций с поворотом на угол θ ,θ_1 соответственно; $S_{пр}$, $S_{поп}$ – перемещения начала координат системы O_1 X_1 Y_1 Z_1 по вектору Z_0 с изменением одновременно двух координат – z, x; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – направляющие единичные векторы , обеспечивающие ортогональность координатных систем; t1, t3, t4, t6, t7 – частные значения времени обработки предмета труда.

По структурной формуле (1) при графическом моделировании в формате 4D мы получим идеальное совпадение тактов отдельных станков (агрегатов), т. е. станки в поточной линии будут синхронизированы по времени. Дальнейший структурный анализ по функциональным признакам и стохастическим воздействиям различного происхождения расширит структурную формулу, при этом расширение можно производить, не прерывая процесса моделирования.

Результаты и обсуждение. Каждая матрица из структурной модели (2) поточной линии имеет графиче-

ское соответствие – вектор, исходящий из начала координат и частное значение времени выполнения данной операции. Для создания графической модели технологического процесса при несложных преобразованиях каждой переходной матрицы структуры (2) производится переход к графикам зависимости перемещений по индивидуальным векторам операций от частного времени выполнения операций. То есть, для создания континуальной модели технологического процесса переходные матрицы не перемножаются, а преобразуются в упорядоченную последовательность графиков перемещений на основе «плавающей» системы координат.

Создадим идеальную модель для поточной обработки древесного сырья в виде хлыстов. Из-за ограниченности места для построения модели по рис. 1, уберём один из агрегатов (сбрасыватель – отсекатель, рис. 1, поз. 3) без ущерба для идеальной линии, поскольку корректировка работы шнекового ориентирующего транспортёра не понадобится из-за идеальности процесса.

Модель может быть идеальной в том случае, если отсутствуют простои или задержки при выполнении технологических операций. Идеальная поточная линия имеет одинаковые частные циклы t_i. На рис. 2 показан фрагмент идеальной модели поточной линии, состоящей из трёх последовательно установленных агрегатов. Технологические циклы у всех участников потока равны $t_i = 8$ с. На рис. 2 первая основная ось времени с градацией 0, 10, 20, 30, 40 с. и т. д. Ниже расположены последующие оси времени (строки), которые идентичны первой верхней оси времени с такой же градацией. На осях времени размещены графики зависимости перемещений от времени в строгой последовательности выполнения технологических операций. При вертикальных сечениях соблюдается главный принцип – предмет труда разный время одинаковое.

Модель технологического процесса (рис. 2) выполнена способом «суммирования по времени», т. е. ось времени формируется путём суммирования частных значений времени, лежащих в основе графиков зависимости перемещений предмета труда в строгой последовательности размещения агрегатов поточной линии и выполнения операций. В первой строке первые три графика соответствуют перемещениям одного и того же предмета труда агрегатами: l_1 – разобщения пакета хлыстов; l_2 – шнекового ориентирующего устройства; l_3 – упоров поперечного транспортёра надвигания (упоры имеют жесткую связь между собой посредством цепей поперечного транспортёра). Жёсткая связь позволяет графики перемещения упоров транспортёра надвигания последовательно отобразить в виде непрерывной цепочки в верхней строке (рис. 2).

Главная задача поточной линии – заполнить упоры поперечного транспортёра одиночными хлыстами. Условно роль упоров играют графики зависимости перемещений от времени, поскольку график содержит основные параметры слешера – шаг упоров, цикл раскряжёвки хлыста и скорость поперечного транспортёра. Пропущен упор, неправильно заполнен, подан хлыст на неподготовленное пространство между упорами и т. д. Всё это скажется на коэффициенте заполнения упоров, что повлечёт снижение производительности. Выполнение операций (рис. 2):

– Iхл (1-я строка) от нулевой отметки шкалы времени совершает разобщение пакета с отделением одного хлыста и перемещением на $l_1 = 1{,}6$ м за 8 с, на отметке шкалы времени 8 с происходит переход хлыста на ориентирующий транспортёр , который ориентирует 1-й хлыст на заданное расстояние l_2 и на отметке времени 16 с производится переход 1-го хлыста на упор слешера, который надвигает 1-й хлыст на дисковые пилы (рис. 1, поз. 5) с циклом 8 секунд;

– IIхл (2-я строка) на 8-й секунде начинает отделяться от пакета с перемещением на расстояние $l_1 = 1{,}6$ м и на 16 секунде от начала работы линии производится переход 2-го хлыста на ориентирующий транспортёр, который ориентирует 2-й хлыст на заранее заданное расстояние l_2 с переходом на 24 секунде с начала работы поточной линии на упор слешера (график перемещения упора на 1-й строке).

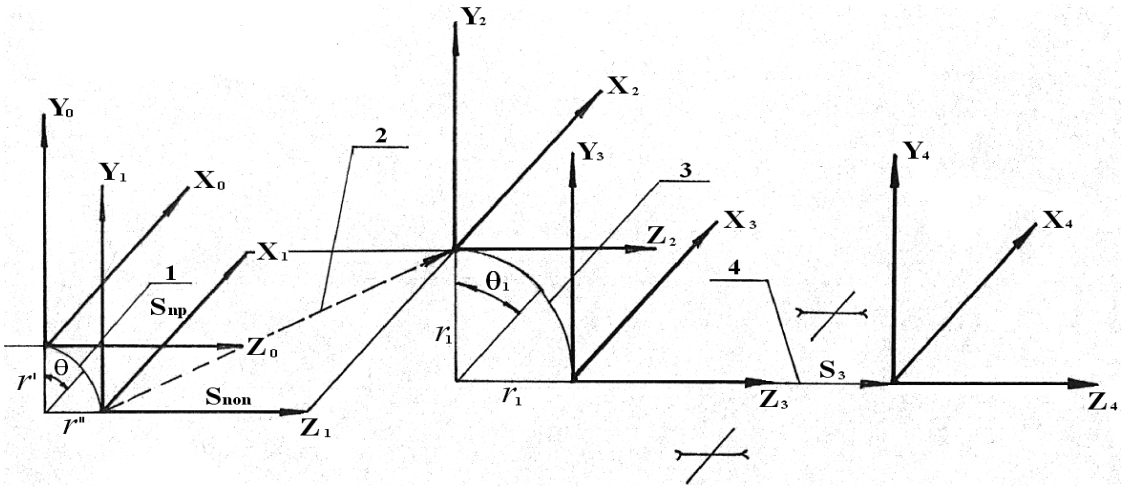

Рис. 1. Структурная схема поточной линии со шнековым транспортёром ориентации хлыстов: 1 – разобщитель хлыстов; 2 – шнековый ориентирующий транспортёр; 3 – отсекатель-сбрасыватель; 4 – слешер; r, r_1 – векторы перемещения начала координатных систем $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, $O_2 X_2 Y_2 Z_2$; радиусы поворота сбрасывателей, θ, θ_1 – текущие углы поворота сбрасывателей соответственно, $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ – O_4 ,X_4, Y_4, Z_4 координатные системы размещённые на предметах труда

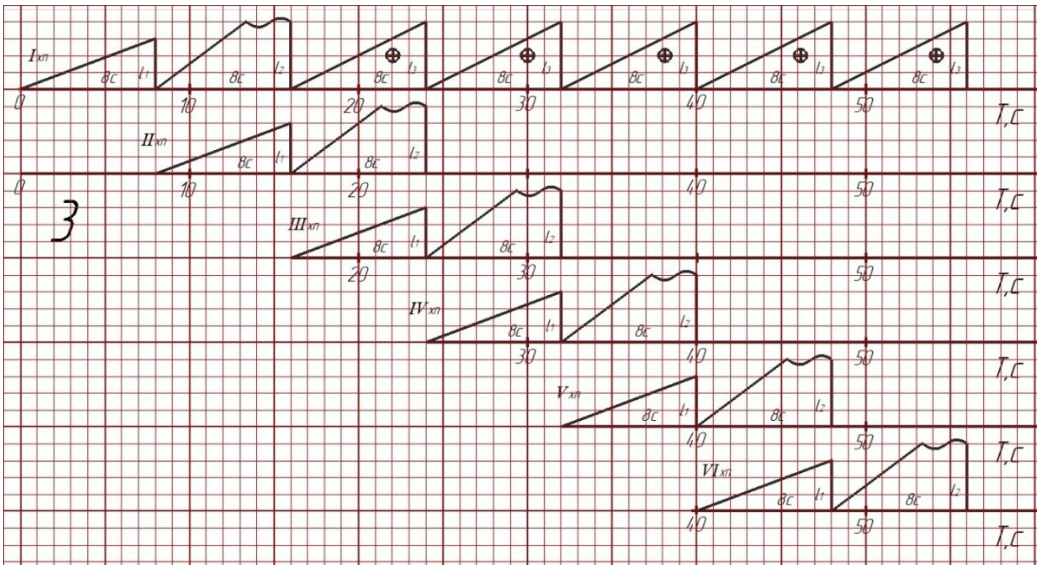

Рис. 2. Фрагмент идеальной модели (метод суммирования по времени)

Дальше процесс будет повторяться без нарушения ритма, поскольку созданная модель является идеальной. Идеальность процесса по рис. 2 заключается в переходах хлыстов с ориентирующего транспортёра (второй агрегат) в начало частного значения времени перемещения упоров поперечного транспортёра слешера.

Проанализируем совмещённость операций. Сделаем сечение по 20 секунде с начала работы линии: 1-й хлыст перемещён упором слешера на 2 м , 2-й хлыст находится в стадии ориентации и перемещён в продольном и поперечном направлениях на 2 м в силу равенства скоростей $V_{пр} = V_{поп}$. 3-й хлыст прошёл 1,5 м от начала разобщения пакета хлыстов.

Процесс моделирования практически всегда сопровождается набором ограничений и соглашений, поскольку модель не повторяет физически оригинал, подвергнутый структурному анализу, который всегда приводит к упрощению. Соглашения и ограничения появляются в разные периоды развития метода моделирования: одна группа ограничений и соглашений формируется сразу при создании метода моделирования; вторая появляется при практическом освоении метода моделирования.

Одно из основных соглашений для данного метода моделирования – переходные процессы, неизменно сопровождающие переместительные операции, по умолчанию учитываются внутри частных значений временных циклов агрегатов. Поэтому переходы на графической модели (рис. 2) мгновенны. В вышеприведённом случае переходы совершаются в нулевых точках векторов перемещений (начало векторов) и в начале частного отрезка времени (нулевая точка – соответствует началу координатной частной системы координат). Данный метод моделирования позволяет учесть переходные процессы в виде псевдоопераций, как в аналитической записи технологического процесса (2), так и в графическом отображении (рис. 2) в том случае, если переходные процессы сопровождаются затратами времени.

Заключение. В результате разработки темы моделирования поточных линий с последовательным расположением оборудования в количестве более двух агрегатов применён метод МПК. Этот метод, на основе графического соответствия ортогональных единичных матриц 4×4, 5×5 формализованной структуре поточного ряда, решает проблему моделирования последовательного сочетания агрегатов и оборудования в количестве более двух единиц. В литературе проблема обозначена многими авторами как нерешённая в смысле формализации и представления результатов моделирования. Формализация проводится на двумерном уровне с представлением результатов в виде двумерных циклограмм.

Предложенное теоретическое обоснование дискретнонепрерывного технологического процесса матрицами 4×4 позволяет проводить структурный анализ с учётом практически любых пространственных перемещений предмета труда с определением или уточнением скоростей перемещений предмета труда. В последствии, структурная формула (1) преобразуется в континуальную модель путём преобразования матриц 4×4 (четырёхмерные) в матрицы 5×5 (пятимерные) с добавлением параметра ti (частного значения времени) цикла i-го агрегата.

Результаты моделирования представлены в виде последовательного отображения дискретно-непрерывного технологического процесса в виде графиков зависимости перемещений от времени. Графики объединены заранее обусловленной последовательностью размещения агрегатов в потоке. Объединение производится на общей непрерывной оси времени T. При моделировании учитывается «плавающий» характер систем координат – каждый предмет труда имеет свою базовую систему относительно единой непрерывной оси времени. Моделирование проведено для идеальной поточной линии, состоящей из трёх агрегатов.

Практическая значимость проведённых исследований заключается в создании модели идеальной поточной линии, предназначенной для исследований влияния различных факторов на протекание технологического процесса первичной обработки древесного сырья.

Литература

1. Григорьева О.И., Гусюк Ф.Н., Григорьев И.В., Задраускайте Н.О., Калита А.Ю., Николаева Ф.В. Использование данных о модельных деревьях при проведении лесотехнической экспертизы // Resources and Technology. 2025. Т. 22. № 3. С. 92–137.
2. Патякин 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 лесообрабатывающих цехов: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2008. 384 с.
3. Колесников Г.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Швецова В.В. Моделирование критических локальных деформаций коры растущего дерева при ветровой нагрузке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 5 (389). С. 100–113.
4. Григорьева О.И., Григорьев И.В., Давтян А.Б., Иванов В.А., Гринько О.И., Швабова Н.В., Калита А.Ю. Влияние ветровой нагрузки на образование пороков в растущих деревьях // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 63–69.
5. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109–116.
6. 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 выпиловке сырья для мачтопропиточных заводов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86–93.
7. Фролов И.С., Григорьев И.В., Тихонов И.И., Кухарева Д.С. Рациональный раскрой хлыстов с большей долей НКД // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. материалы Международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ; Правительство Вологодской области; Департамент лесного комплекса Вологодской области; Вологодский государственный университет. 2016. С. 92–94.
8. Рябухин П.Б., Григорьев И.В., Жук А.Ю. Обоснование конструктивных параметров узлов пильного аппарата установки для групповой раскряжевки // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1 (57). С. 37–42.
9. Казаков Н.В., Рябухин П.Б., Григорьев И.В. Повышение эффективности автоматизированного учета древесной продукции лесозаготовительного предприятия // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 1 (65). С. 138–145.
10. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Лесозаготовительные машины на экскаваторной базе // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 45–46.
11. Мохирев А.П., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Григорьева О.И., Войнаш С.А. Совершенствование конструкции полноповоротных лесозаготовительных машин на экскаваторных базах // Строительные и дорожные машины. 2018. № 6. С. 43–49.
12. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Совершенствование конструкции валочно-пакетирующей машины // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 2 (203). С. 57–60.
13. Серяков С.А., Куницкая О.А., Григорьева О.И. Безопасность и охрана труда при эксплуатации и обслуживании импульсных харвестерных головок // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 3. С. 27–37.
14. Григорьев И.В., Тихонов И.И., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Устройства для контроля за весом груза на сухопутном лесовозном транспорте // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 6 (207). С. 53–56.
15. Тихонов И.И., И.В. Григорьев Технологический процесс лесосечных работ при вывозке древесины полудеревьями // Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону». Вологда: ВоГТУ, 2008. Т. 1. С.188–189.
16. Пигнастый О.М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математика. 2014. С. 3–12.
17. Пигнастый О.М., Заруба В.Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконференция по проблемам управления: тезисы докладов 6-ой Всероссийской научно-практической конференции (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября – 5 октября 2013.) Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. Том. 3. С. 157–161.
18. Богатова Е.Ю., Григорьев И.В. Перспективы развития лесного машиностроения России // Леса России в XXI веке. Материалы одиннадцатой международной научно-технической интернет-конференции, посвященной 85-летию Лесоинженерного факультета СПбГЛТУ и 95-летию кафедры Сухопутного транспорта леса. Коллектив авторов. 2014. С. 153–156.
19. Лозовой В.А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжевочных линий // Лесоэксплуатация: межвуз. сб. научн. тр. Красноярск: СибГТУ, 1998. С. 133–139.
20. Lozovoy V., Nikonchuk A., Nikonchuk M. Structural analysis and formalization of continuous flow technologies in timber harvesting FTA // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 316 (2019) 012030. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/316/1/012030.
21. 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.

References

1. Grigoreva O.I., Gusyuk F.N., Grigoriev I.V., Zadraskaite N.O., Kalita A.Yu., Nikolaeva F.V. The use of data on model trees during forestry expertise // Resources and Technology. 2025. Vol. 22. № 3. pp. 92–137.
2. Patyakin V.I., Redkin A.K., Bazarov S.M., Birman A.R., Bit Yu.A., Grigoriev I.V., Shadrin A.A., Chemodanov A.N. Technology and equipment of timber warehouses and timber processing workshops: textbook. A guide for university students. Moscow: Publishing House of the Moscow State University of Forests, 2008. 384 p.
3. Kolesnikov G.N., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Makuyev V.A., Storodubtseva T.N., Shvetsova V.V. Modeling of critical local deformations of the bark of a growing tree under wind load // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. 2022. No. 5 (389). pp. 100–113.
4. Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Davtyan A.B., Ivanov V.A., Grinko O.I., Shvabova N.V., Kalita A.Yu. Influence of wind load on the formation of defects in growing trees // Systems. Methods. Technologies. 2021. No. 2 (50). pp. 63–69.
5. Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Nikiforova A.I., Glukhovsky V.M. Promising directions for the development of technological processes of logging operations // Proceedings of BSTU. No. 2. Forestry and woodworking industry. 2016. No. 2 (184). pp. 109–116.

6. Kunitskaya O.A., Tikhonov I.I., Kunitskaya D.E., Grigorev I.V., Zemtsovsky A.E. Optimization of the process of buckling whips at timber processing bases of forest holdings when sawing raw materials for mast-impregnation plants // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Forest magazine. 2014. No. 3 (339). pp. 86–93.
7. Frolov I.S., Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Kukhareva D.S. Rational cutting of whips with a larger amount of NKD // Actual problems of the development of the forest complex. materials of the International Scientific and Technical Conference. Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Government of the Vologda Region; Department of the Vologda Region Forestry Complex; Vologda State University. 2016. pp. 92–94.
8. Ryabukhin P.B., Grigorev I.V., Zhuk A.Yu. Justification of the design parameters of the saw blade assembly of the installation for group bucking // The system. Methods. Technologies. 2023. No. 1 (57). pp. 37–42.
9. Kazakov N.V., Ryabukhin P.B., Grigorev I.V. Improving the efficiency of automated accounting of timber products // The system. Methods. Technologies. 2025. No. 1 (65). pp. 138–145.
10. Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Logging machines on an excavator base // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. 2018. pp. 45–46.
11. Mohirev A.P., Grigorev I.V., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I., Voynash S.A. Improving the design of full-turn logging machines at excavator bases // Construction and road machinery. 2018. No. 6. pp. 43–49.
12. Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Nikiforova A.I., Grigorieva O.I. Improving the design of the rolling-packing machine // Handbook. An engineering magazine. 2014. No. 2 (203). pp. 57–60.
13. Seryakov S.A., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Occupational safety and health during operation and maintenance of pulsed harvester heads // Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2023. No. 3. pp. 27-37.
14. Grigorev I.V., Tikhonov I.I., Nikiforova A.I., Grigoreva O.I. Devices for monitoring cargo weight on land logging transport // Handbook. Engineering magazine. 2014. No. 6 (207). pp. 53–56.
15. Tikhonov I.I., I.V. Grigorev The technological process of logging operations during the removal of wood by semi-trees // Materials of the sixth All-Russian scientific and technical conference «University Science for the region». Vologda: VoGTU, 2008. Vol.1. pp.188–189.
16. 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.
17. Pignastyi 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 of the Southern Federal University, 2013. Vol. 3 pp. 157–161.
18. Bogatova E.Yu., Grigorev I.V. Prospects for the development of Russian forestry engineering // Forests of Russia in the XXI century. Materials of the eleventh international scientific and technical Internet conference dedicated to the 85th anniversary of the Forestry Engineering Faculty of St. Petersburg State Technical University and the 95th anniversary of the Department of Land Transport of Forests. The team of authors. 2014. pp. 153–156.
19. Lozovoy V.A. Matrix transformation of coordinates in relation to the structural analysis of ridge lines // Forest exploitation: interuniversity collection of scientific tr. – Krasnoyarsk: SibGTU, 1998. pp. 133–139.
20. Lozovoy V., Nikonchuk A., Nikonchuk M. Structur-al analysis and formalization of continuous flow tech-nologies in timber harvesting FTA // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 316 (2019) 012030. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/316/1/012030.
21. Vorobyov E.I., Popov S.A., Sheveleva G.I. Mechanics of industrial robots: in 3 books. Book 1. Kinematics and Dynamics – Moscow: Higher School of Economics, 1988–304 p.