

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТОДОМ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ КООРДИНАТ**В. А. Лозовой, М. Ю. Никончук, Д. Ю. Литвинов**

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский Рабочий», 31
E-mail: lva_sstu@mail.ru

В статье приводится определяющий замысел моделирования технологического процесса поточных линий с последовательно установленными станками. В лесопромышленном комплексе формализация технологий в такой постановке вопроса актуальна, поскольку модели для последовательных потоков из станков более двух слабо формализованы. При этом технологический процесс описывается методами теории массового обслуживания с широким привлечением вероятностных характеристик предмета труда и оборудования. Предлагаемая концепция построения моделей дискретно-непрерывных поточных линий, с применением метода матричных преобразований координат (МПК), позволяет систематизировать описание технологического процесса с возможностью учета различных стохастических возмущений на любой стадии моделирования.

Статистические характеристики процесса возможно получить при достаточно большом количестве реализаций моделирования цикла обработки предмета труда. Количество последовательно установленного оборудования при этом не ограничено. Для создания модели технологического процесса поточная технология из последовательно установленного оборудования представляется в виде структурной формулы с применением метода МПК. За базовый метод задания систем координат принят метод «плавающих» координат, который отличается от метода Денавит – Хартенберга отсутствием абсолютной системы координат и позволяющий описать дискретно-непрерывный (континуальный) технологический процесс. Задание «плавающих» систем координат является основополагающим условием представления модели технологического процесса в формате 4D.

Наряду с этим предлагается идеализация модели технологического процесса в виде циклограмм и определением скоростей перемещения предмета труда на каждом из агрегатов. Идеализация необходима при создании новых технологий, в которых невозможно применить основные параметры (скорости перемещений, пути перемещений) как предмета труда, так и исполнительного оборудования по аналогии. Для повышения информативности графоаналитической модели технологического процесса создается модель на основе диагональных единичных ортогональных матриц 5×5 . Достигнуто это введением дополнительного независимого параметра t (времени). Описание структуры технологического процесса матрицами 5×5 позволяет моделировать технологический процесс графическим методом с учетом любых возмущений как внутреннего, так и внешнего характера с коррекцией в виде стохастических возмущений без прерывания процесса моделирования.

Ключевые слова: поточные линии; «плавающие» координаты; матрицы 4×4 , 5×5 ; графическая интерпретация матриц; идеальная модель; матричные преобразования координат.

*Conifers of the boreal area. 2022, Vol. XL, No. 6, P. 552–557***CONCEPT OF MODELING IN-LINE TECHNOLOGIES BY THE METHOD OF MATRIX TRANSFORMATIONS OF COORDINATES****V. A. Lozovoy, M. Y. Nikonchuk, D. Y. Litvinov**

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: lva_sstu@mail.ru

The article presents the defining idea of modeling the technological process of production lines with sequentially installed machines. In the timber industry, the formalization of technologies in such a formulation of the question is relevant, since models for sequential lines from more than two machines are poorly formalized. At the same time, the technological process is described by the methods of queuing theory with a wide involvement of probabilistic characteristics of the object of labor and equipment. The proposed concept of constructing models of discrete-continuous production lines, using the method of matrix transformations of coordinates (MTC) allows to systematize the description of the technological process with the possibility of accounting various stochastic disturbances at any stage of modeling.

Statistical characteristics of the process can be obtained with a sufficiently large number of implementation of modeling the processing cycle of the object of labor. The number of sequentially installed equipment is not limited. In order to create a process model, the line technology from the sequentially installed equipment is represented in the form of a structural formula using the MTC method. The method of “floating” coordinates is accepted as the basic method of specifying coordinate systems, which differs from the Denavit – Hartenberg method in the absence of an absolute coordinate system and allows to describe a discrete-continuous technological process. Setting of “floating” coordinate systems is a fundamental condition for presenting a process model in 4D format.

Alongside this, the idealization of the technological process model in the form of cyclograms and the determination of the speeds of movement of the object of labor on each of the units is proposed. Idealization is necessary for creating new technologies in which it is impossible to apply the basic parameters (movement speeds, movement paths) both as the object of labor and implementing equipment by analogy. To increase the informativeness of the graphoanalytic model of the technological process, a model based on diagonal single orthogonal matrices 5×5 is created. This was achieved by introducing an additional independent parameter t (time). Description of the structure of the technological process by 5×5 matrices allows to simulate the technological process graphically, taking into account any disturbances of both internal and external nature with correction in the form of stochastic disturbances without interrupting the modeling process.

Keywords: production lines; “floating” coordinates; 4×4 , 5×5 matrices; graphical interpretation of matrices; ideal model; matrix transformations of coordinates.

ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие информационных технологий, автоматизации и компьютеризации смежных отраслей, обеспечивающих существенную модификацию исходного сырья в отраслях глубокой переработки древесины (целлюлозно-бумажная, фанерная, древесно-плитная), неизменно накладывает отпечаток и на лесозаготовительную отрасль. Созданы теоретические основы для автоматизированного оптимального раскроя предмета труда (хлыстов) на стадии первичной переработки. Глубоко исследованы размерно-качественные характеристики и закономерности протекания технологических операций на лесных складах. До 1985 года парк и номенклатура технологических машин на лесозаготовках бурно расширялся, а сами машины постоянно совершенствовались в соответствии с прогрессом технологии, техники и организации труда. Накоплен богатый опыт по созданию автоматических и полуавтоматических линий для раскроя сырья в деревообработке и в отраслях потребителях. Вопросам моделирования предмета труда, моделирования технологических процессов, исследованию операций лесоскладских работ, исследованиям взаимосвязей между отдельными технологическими участками лесных складов, процессов динамического взаимодействия предмета труда первичной обработки древесины с рабочим оборудованием, процессам автоматизированной оптимизации раскроя предмета труда, структурному синтезу автоматизированных технологий посвятили свои труды: И.В. Батин, С.П. Бойков, Д.К. Воевода, Ю.И. Верхов, Б.Г. Гастев, В.А. Дорошенко, Д.Л. Дудюк, А.В. Жуков, Ф.Е. Захаренков, В.К. Захаров, Б.Г. Залегаллер, Л.С. Ильницкий, Р.Н. Ковалев, Л.В. Коротяев, П.В. Ласточкин, В.С. Петровский, В.Ф. Полетаikin, А.К. Редькин, Г.А. Степаков, А.С. Торопов и многие другие. Трудом многих коллективов в стране была создана развитая сеть лесозаготовительных и перерабатывающих предприятий, которые заготавливали и перерабатывали огромное количество древесины. Изменившиеся отношения в экономике страны требуют

пересмотра традиционных технологий для первичной обработки древесного сырья, основой которых являются системы машин 1НС и 2НС [1; 2].

Воспроизводство устаревшего оборудования с поперечной подачей типа ЛО-105 на сегодняшний день дорого, серийно выпускавшаяся линия ЛО-15С с продольной подачей также не устраивает ни мелкого, ни крупного производителя, как по цене, так и по производительности. Большой разрыв в производительностях между линиями с продольной подачей и поперечным перемещением хлыстов является сдерживающим фактором при проектировании новых производств. Отсутствие унификации и агрегатно-блочного принципа компоновки технологических схем не позволяет создать унифицированные ряды оборудования для первичной обработки древесного сырья. Компоновка поточных линий отдельными агрегатами от разных поточных линий, прошедшими проверку в производственных условиях, ведет к нарушению программных связей (синхронизации) между агрегатами, что сказывается на ритмичности технологических потоков и ведет к снижению производительности. Проведение эффективных научных исследований по совершенствованию исполнительных технологий и оборудования немислимо без моделирования технологических процессов с использованием ЭВМ, которые позволяют решать многоуровневые и многокритериальные задачи с эффективным использованием имеющихся научных разработок по параметрам предмета труда (хлыстов), тем более, что стоимость таких исследований в десятки раз ниже стоимости натурных и статистических исследований. Совершенствование теоретической базы для моделирования, анализа, синтеза и использование промышленных контроллеров – необходимое условие для реализации основных принципов ресурсосбережения и совершенствования исполнительных технологий и оборудования. С развитием автоматизации и компьютеризации на базе накопленного опыта проектирования и теоретических исследований необходимо создать теоретическую базу для синтеза технологий, обеспе-

чивающих реализацию автоматизированных принципов раскроя сырья, на базе программного управления в функциях положения или времени [4; 5; 6].

На сегодняшний день осуществить программное управление на устаревшем исполнительном оборудовании и станках не представляется возможным. Необходимо создание принципиально новых технологий с исполнительными механизмами, наиболее пригодными для реализации прогрессивных принципов управления и программирования раскроя. Интенсификация режимов (т.е. сокращение циклов операций) неизбежно влечет за собой увеличение скоростей, совмещение во времени пространственных перемещений и требуют обязательного приборного контроля.

Исполнительное оборудование на первичной обработке древесины активно взаимодействует с предметом труда (хлыстами, сортиментами). Предмет труда, в свою очередь, имеет размерно-качественные и динамические характеристики. Размерно-качественные характеристики учитываются при проектировании исполнительных технологий, а характер взаимодействия с оборудованием зависит от требуемых (заданных) размерно-качественных характеристик продукта труда (сортиментов). Динамические характеристики (масса, жесткость, частотные характеристики) учитываются практически на всех стадиях первичной обработки древесного сырья (валка, трелевка, обрезка сучьев, погрузка) и активно влияют на протекание технологического процесса при раскряжке, а также влияют на силовую нагрузку рабочего оборудования.

Переход от устаревших конструкций и исполнительных технологий к более прогрессивным затрудняется тем, что отсутствует, с точки зрения автоматизированной оптимизации раскроя лесоматериалов, формализованный анализ технологических структур для первичной обработки древесины с теоретическим обоснованием динамического и технологического воздействия предмета труда на исполнительное оборудование в процессе перемещений.

При широком распространении поточных технологий и сокращении дорогостоящих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, насущной проблемой становится создание практического моделирования континуальных технологических процессов поточных линий с последовательно установленным оборудованием в количестве более двух [1; 3; 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значительная вариативность размерно-качественных характеристик древесного сырья и не однозначность позиционирования при перемещениях круглых лесоматериалов оборудованием поточных линий – отличительные черты технологических процессов в лесопромышленном комплексе [1; 3; 8; 10]. Для построения модели технологического процесса поточных линий необходимо создать метод моделирования, позволяющий представить структуру поточной линии, возможность структурного анализа по функциональными признакам, возможность реализации необходимого количества циклов обработки предмета труда, возможность изменения параметров модели

в процессе постановки эксперимента как много факторного, так и однофакторного.

Целью данной работы является описание последовательности создания моделей технологического процесса дискретно-непрерывного характера, отображающих специфику лесопромышленного комплекса.

Процессу моделирования предшествует структурный анализ, который определяет статистические и функциональные характеристики системы поточной технологии [3].

Объектами структурного анализа являются различные технологические потоки, рассматриваемые в целом. Последующая декомпозиция целостной структуры на подсистемы позволяет оценить свойства системы с количественной и качественной стороны. К основным показателям исследуемых структур в общем случае относятся:

- множества выделенных элементов отношений и связей (для поточных линий, оборудование, связи между оборудованием, особенность взаимодействия);
- характеристики элементов и связей;
- эффективность системы (для поточных линий – производительность потока, коэффициенты загрузки оборудования, влияние размерно-качественных характеристик предмета труда на протекание технологического процесса).

Общая процедура структурного анализа включает следующие основные этапы [3]:

1. Декомпозиция системы на интересующие исследователя подсистемы и элементы.
2. Определение качественных и количественных показателей (характеристик) выделенных структур, оценивание структур.
3. Формирование критериев и оценка эффективности выделенных структур.
4. Принятие решения о необходимости совершенствования структурных характеристик системы.

Перечисленные общие положения по структурному анализу подходят для анализа, например, системы управления поточными линиями [7]. Но для создания системы управления необходима модель технологического процесса, которая должна отображать взаимосвязь между агрегатами в процессе технологического процесса.

Опираясь на приведённый алгоритм структурного анализа, сформируем этапы анализа и построение модели технологического процесса с учетом специфики поточных технологий в лесопромышленном комплексе. Предлагаемый алгоритм относится как для вновь создаваемых, так и для технологий существующих потоков. В первом случае определяются основные параметры поточной линии, во втором – определяются параметры для модернизации.

На первом этапе решаются общепринятые вопросы структурного анализа:

- определяется тип, класс, назначение поточной линии (проводится классификация поточных линий [3; 4];
- определяется структура поточной линии по составу и назначению оборудования;
- создаётся расчётная схема, которая может быть представлена в виде:

а) аксонометрической проекции технологической схемы с расстановкой координатных систем присвоенных предмету труда или автономному оборудованию;

б) в виде графа с вершинами, обозначающими наименование операции и, ребрами, соответствующими векторам перемещений. При этом ребра можно ориентировать по осям координат соответствующих направлений перемещений. Вершины, относящиеся к оборудованию обозначаются как изолированные вершины с обозначением рабочих перемещений в виде векторов (например, в линии ЛО-15С раскрывочная установка АЦ-3С, которая совершает при пилении возвратно- поступательные перемещения пильного диска при раскрывке);

в) расчетную схему, для технологических потоков, лежащих в одной плоскости, допускается сразу представлять в виде координатной системы для одного предмета труда, перемещаемого последовательно по всем агрегатам поточной линии. Составленная последовательность координатных систем, заданных для каждого предмета труда представляет собой основу «плавающей» системы координат, которая отличается от общепринятого метода задания систем координат Денавит – Хартенберга [9], отсутствием исходной (базовой, неподвижной абсолютной, системы координат). Базовая система задается для каждого предмета труда отдельно и существует во времени и пространстве до тех пор, пока предмет труда находится в обработке. При выполнении пунктов «а» и «б», необходимо задать «плавающую» систему координат по пункту «в».

РЕЗУЛЬТАТЫ

На втором этапе структура технологического процесса представляется в виде аналитической записи технологического процесса квадратными единичными диагональными матрицами 4×4 в развернутом виде или в сокращенной записи. Аналитическое выражение структуры технологического процесса представляет собой произведение матриц 4×4 . При представлении структуры технологического процесса в виде произведения матриц мы имеем структурную формулу соответствующую преобразованиям координат при перемещении одного предмета труда. Результирующей геометрический смысл произведения матриц – сумма векторов перемещений предмета труда, которая является графической интерпретацией преобразования матриц 4×4 .

Далее проводится структурный анализ оборудования по функциональным признакам, то есть, определяются дополнительные подготовительные перемещения, отличные от главного вектора перемещений присущего данному оборудованию. При этом необходимо учитывать простои и задержки технологического процесса из-за конструктивных особенностей оборудования или физических характеристик предмета труда [8; 10]. В дальнейшем результаты структурного анализа учитываются при графическом моделировании в виде стохастических воздействий на технологический процесс внутреннего или внешнего характера.

– описывается технологический поток в векторной форме с учетом функциональных особенностей оборудо-

вания и технологических требований по обработке предмета труда, например, древесных хлыстов;

– определяются границы требуемой производительности (P_{cm});

– вычисляется время цикла обработки единицы предмета труда, например, древесного хлыста с учетом региональных особенностей;

– определяются основные параметры оборудования с учетом размерно-качественных характеристик предмета труда (скорость перемещений, расстояние перемещений) [10; 11];

– создается алгоритм технологического процесса с учетом типа процесса (циклического действия, дискретно-непрерывного);

– производится переход от формализации технологического процесса в виде циклограмм к векторной сумме (матрицы 4×4);

– создается идеальная модель в статистическом смысле (постоянные параметры, характеризующие оборудование, постоянные параметры по размерно-качественным характеристикам, постоянные параметры технологических воздействий на предмет труда [13];

– далее производится формализация технологического процесса в формате 4D при помощи матриц 5×5 с включением в описание процесса независимой переменной T (времени);

– для более ясного понимания техники графического моделирования производится интерпретация геометрического смысла матриц 5×5 с применением независимого параметра T (времени);

– определяются факторы, влияющие на протекание технологического процесса (простой, заклинивание инструмента, дополнительные подготовительные перемещения предмета труда, влияние размерно-качественных характеристик предмета труда (диаметр, длина), влияние функциональных признаков оборудования (выравнивание предмета труда, устранение, например, перехлеста вершин вплоть до изменения скоростей и расстояний перемещений). В процессе реализации графоаналитической модели технологического процесса возмущающие факторы включаются в процесс моделирования без возвращения к начальному этапу моделирования;

– назначаются границы варьирования статистически значимых факторов, например, цикл гидроманипулятора по технической характеристике соответствует $t_{max} = 40$ с, $t_{min} = 10$ с. Назначается шаг варьирования по времени t_i , в зависимости от расположения предмета труда (хлыста) в пакете;

– создается структурная запись технологического процесса в виде произведения матриц 5×5 , которые описывают последовательность выполнения операций технологическим потоком с учетом всех возмущений, влияющих на технологический процесс.

– создается технологическая матрица, характеризующая цикличность процесса (при циклическом характере – без совмещения операций; при непрерывном – с совмещением операций во времени [12; 13]);

– создается структурная формула технологического процесса в виде единичных диагональных ортогональных матриц 5×5 с включением всех возмущающих внешних и внутренних факторов);

- осуществляется моделирование технологического процесса в графической форме;
- графическая интерпретация, подтвержденная теоретическим обоснованием, представляет собой непрерывную ось времени, состоящую из суммы затрат времени $\sum t_i$ с построенным на i -том отрезке графиком изменения приращения вектора i -го перемещения
- по результатам графо-аналитического моделирования производится оценка влияния отдельных факторов на время цикла обработки предмета труда или осуществляется комплексная оценка влияния множества факторов на технологический процесс.

ДИСКУССИЯ

Представленный порядок создания модели поточной линии из последовательно установленного оборудования впервые представлен в комплексе решения проблемы. Ранее изданные материалы в разрозненном виде не давали целостности подхода к решению проблемы. Следует отметить, что требуются дополнительные публикации по практическому моделированию, которые значительно усилят значимость предложенного теоретического обоснования метода.

ВЫВОДЫ

1. Представленный выше порядок создания модели технологического процесса подходит как для дискретно-циклических, так и для дискретно-непрерывных технологических процессов с совмещением операций во времени.
2. Графическое моделирование масштабированно. При назначении масштаба отображаемых процессов, имеется возможность оценивать точность графики.
3. Основные отличия от циклограммного метода моделирования заключаются в возможности учитывать скорость, расстояние, время выполнения технологической операции, то есть учитывается три параметра протекания процесса при наглядной графической демонстрации совмещения операций.
4. Результаты графического анализа позволяют получить характеристики протекания технологического процесса как при однофакторном, так и многофакторном эксперименте.
5. Моделирование дискретно-непрерывного технологического процесса в графическом виде позволяет на стадии проектирования предусматривать контрольно-измерительные приборы системы управления поточной линии, в том числе с обратной связью, поскольку именно графическое моделирование позволяет в должной мере оценить непрерывность процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Редькин А.К., Якимович С.Б. Математическое моделирование и оптимизация технологий лесозаготовок : учебник для вузов. М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 504 с.: ил.
2. Лозовой В.А. Синтез технологических структур для первичной обработки древесного сырья // Химико-лесной комплекс – научное и кадровое обеспече-

ние в XXI веке. Проблемы и решения : сборник статей по материалам конференции. Красноярск : СибГТУ, 2000. С. 123–126.

3. Прохорова И.А. Теория систем и системный анализ : учебное пособие. Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. 2013. 49 с.

4. Пигнастый О.М. Основы статистической теории построения континуальных моделей производственных линий. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математика. 2014. С. 32.

5. Пигнастый О.М., Заруба В. Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконференция по проблемам управления: тезисы докладов 6-й Всероссийской научно-практической конференции (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября-5 октября 2013 г.). Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального университета, 2013. Том. 3. С. 157–161. Доступно: <https://goo.gl/RRQ3Wd> -----

6. Gross D., Harris C. Fundamentals of Queueing Theory. New York : Wiley, 1974. 490 p.

7. Armbruster D., Ringhofer C., Jo T-J. Continuous models for production flows // Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004. P. 4589–4594.

8. Лозовой В.А., Балдаков И. А., Миронов Г.С. Структурный анализ оборудования раскряжевочных установок для первичной обработки древесных хлыстов // Вестник КрасГАУ. Вып. 4. Красноярск, 2014. С. 232–238. Изд. ВАК.

9. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics, vol. 22, trans. ASME, vol. 77, series E., 1955, P. 215–221.

10. Лозовой, В. А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжевочных линий // Лесозаготовка : межвуз. сб. научн. тр. Красноярск : СибГТУ, 1998. С. 133–139.

11. Лозовой В. А. Моделирование технологического процесса линий для первичной обработки хлыстов // Лесозаготовка : межвуз. сб. науч. тр. Красноярск : СибГТУ, 1998. С. 91–95.

12. Lozovoy V.A., Niconchuk A.B. Gevargis M.Yu. 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.

13. Lozovoy V.A., Litvinov D. Idealization of formalized flow technology mode// Österreichisches Multiscience Journal. Innsbruck, Austria / Vol. 1, No. 34 (2020). P. 72–75. ISSN 1740-1798.

REFERENCES

1. Red'kin A.K., Yakimovich S.B. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya tekhnologiy lesozagotovok : uchebnik dlya vuzov. M. : GOU VPO MGUL, 2005. 504 s.: il.
2. Lozovoy V.A. Sintez tekhnologicheskikh struktur dlya pervichnoy obrabotki drevesnogo syr'ya // Khimiko-lesnoy kompleks – nauchnoye i kadrovoye obespecheniye v KhKhI veke. Problemy i resheniya : sbornik statey po materialam konferentsii. Krasnoyarsk : SibGTU, 2000. S. 123–126.

3. Prokhorova I.A. Teoriya sistem i sistemnyy analiz : uchebnoye posobiye. Chelyabinsk : Izdatel'skiy tsentr YuUrGU. 2013. 49 s.
4. Pignastyy O.M. Osnovy statisticheskoy teorii postroyeniya kontinual'nykh modeley proizvodstvennykh liniy. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Matematika. 2014. S. 32.
5. Pignastyy O.M., Zaruba V. Ya. Kontinual'noye modelirovaniye proizvodstva na potochnykh liniyakh // Mul'tikonferentsiya po problemam upravleniya: tezisy dokladov 6-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (MKPU-2013), (Divnomor'ye, 30 sentyabrya-5 oktyabrya 2013 g.). Rostov-na-Donu : Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2013. Tom. 3. S. 157–161. Dostupno: <https://goo.gl/RRQ3Wd> -----
6. Gross D., Harris C. Fundamentals of Queueing Theory. New York : Wiley, 1974. 490 p.
7. Armbruster D., Ringhofer C., Jo T-J. Continuous models for production flows // Proceeding of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004. P. 4589–4594.
8. Lozovoy V.A., Baldakov I. A., Mironov G.S. Strukturnyy analiz oborudovaniya raskryazhevochnykh ustanovok dlya pervichnoy obrabotki drevesnykh khlystov // Vestnik KrasGAU. Vyp. 4. Krasnoyarsk, 2014. S. 232–238. Izd. VAK.
9. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics, vol. 22, trans. ASME, vol. 77, series E., 1955, P. 215–221.
10. Lozovoy, V. A. Matrichnoye preobrazovaniye koordinat primenitel'no k strukturnomu analizu raskryazhevochnykh liniy // Lesoekspluatatsiya : mezhvuz. sb. nauchn. tr. Krasnoyarsk : SibGTU, 1998. S. 133–139.
11. Lozovoy V. A. Modelirovaniye tekhnologicheskogo protsessa liniy dlya pervichnoy obrabotki khlystov // Lesoekspluatatsiya : mezhvuz. sb. nauch. tr. Krasnoyarsk : SibGTU, 1998. S. 91–95.
12. Lozovoy V.A., Nikonchuk A.V. Gevargis M.Yu. 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.
13. Lozovoy V.A., Litvinov D. Idealization of formalized flow technology mode// Osterreichisches Multiscience Journal. Innsbruck, Austria / Vol. 1, No. 34 (2020). P. 72–75. ISSN 1740-1798.

© Лозовой В. А., Никончук М. Ю.,
Литвинов Д. Ю. 2022

Поступила в редакцию 10.04.2022
Принята к печати 10.11.2022