

Системный анализ лесозаготовительной логистики

Ю.И. Беленький^{1a}, В.А. Иванов^{2b}, В.А. Соколова^{1c}, Н.Г. Токарев^{1d},
Н.С. Петрова^{1e}, М.В. Степанищева^{2f}

¹ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a 2000zalom@gmail.com, ^b Ivanovva55@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d tokarevn@me.com,

^e natalya-petrova145@mail.ru, ^f marina01031977@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0009-0006-8449-1258>, ^e <https://orcid.org/0009-0004-0110-2225>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Статья поступила 05.09.2024, принята 17.09.2024

Лесозаготовительное производство представляет собой системы технических операций заготовки, переработки и перемещения материала древесины от мест естественного произрастания до потребителя. На рынке лесного машиностроения каждой операции соответствует своя лесная техника, в свою очередь, операция характеризуется временем и расстоянием ее выполнения, поэтому основными показателями эффективности технической операции в настоящее время следует считать не только производительность предмета труда в единицу времени, но и количество продукции, получаемой или перемещенной на единицу расстояния. Композиции лесозаготовительных операций образуют своего рода материальный поток во времени и пространстве, определяемый начальным и конечным пунктами. Для получения максимального эффекта оптимизации лесозаготовительного процесса необходимо, чтобы научные достижения трех объективно взаимосвязанных наук — логистики, кибернетики и системного анализа были использованы в хозяйственной практике предприятиями. Логистическая система представляет собой функционально взаимосвязанные операции, образующие единый материальный поток с сопутствующими потоками информации и финансов. Основным конструктивным принципом логистики является принцип системности, согласно которому материальный, информационный и финансовые потоки образуют единую многофакторную динамическую структуру. Кибернетика занимается оптимальным управлением сложных динамических систем, математическое моделирование является неотъемлемой составной частью кибернетического управления. Связность технических операций в логистическом потоке происходит в функциональном времени-пространстве. Принцип быстродействия при системном подходе реализуется как максимально возможная синхронизация функционального времени между операционным взаимодействием.

Ключевые слова: операция; поток; эффективность; расстояние; время; техника; связность.

System analysis of logging logistics

Yu.I. Belenkiy^{1a}, V.A. Ivanov^{2b}, V.A. Sokolova^{1c}, N.G. Tokarev^{1d},
N.S. Petrova^{1e}, M.V. Stepanishcheva^{2f}

¹ Higher School of Technology and Energy of St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a 2000zalom@gmail.com, ^b Ivanovva55@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d tokarevn@me.com,

^e natalya-petrova145@mail.ru, ^f marina01031977@inbox.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0009-0006-8449-1258>, ^e <https://orcid.org/0009-0004-0110-2225>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Received 05.09.2024, accepted 17.09.2024

Logging production is a system of technical operations for harvesting, processing and moving wood material from places of natural growth to the consumer. In the forestry engineering market, each operation corresponds to its own forestry equipment, in turn, the operation is characterized by the time and distance of its implementation. Therefore, the main indicators of the effectiveness of a technical operation at present are not only the productivity of the subject of labor per unit of time, but also the number of products received or moved per unit distance. Compositions of logging operations form a kind of material flow in time and space, determined by the starting and ending points. To obtain the maximum effect of optimizing the logging process, it is necessary for enterprises to use the scientific achievements of three objectively interrelated sciences such as logistics, cybernetics and systems analysis in business practice. The logistics system represents functionally interrelated operations that form a single material flow with accompanying flows of information and finance. The main constructive principle of logistics is the principle of consistency, according to which material, information and financial flows form a single multifactor dynamic structure. Cybernetics deals with the optimal control of complex dynamic systems, mathematical modeling is an integral part of cybernetic control. The connectivity of technical operations in the logistics flow occurs in

functional time-space. The principle of speed in a systems approach is implemented as the maximum possible synchronization of functional time between operational interactions.

Keywords: operation; flow; efficiency; distance; time; technique; connectivity.

Введение. Современное лесозаготовительное производство является сложным технико-экономическим комплексом, устойчивость которого достигается через оптимизацию производственной деятельности с применением научных методов, базирующихся на таких дисциплинах, как логистика, кибернетика, системный анализ, математическая статистика и др.

Специфика переработки и транспортировки лесоматериалов требует разработки лесозаготовительной логистики, основывающейся на общих научных принципах логистики и формирующей собственные критерии эффективности системно-динамических процессов: производительность во времени и пространстве, мощность, технологическая скорость и их относительные показатели.

Рациональное планирование, организация, руководство и контроль над процессами производства и перемещения материальных потоков от первичного сырья до конечного потребителя являются ключевыми задачами логистики. Логистика в современном понимании представляет собой интегрированную концепцию управления материальными, информационными и финансовыми потоками на разных уровнях управления [1; 2].

Основные критерии логистики, такие как время, качество, скорость, расстояние и производственные затраты, также определяют эффективность процессов в лесозаготовительной отрасли. В связи с широким применением логистических принципов различают виды логистики, такие как военная, бизнес, транспортная, информационная, экологическая и др.

Каждый уровень логистического управления, от предприятия до федерального уровня, решает специфические задачи, основываясь на общих принципах логистики. Эти принципы актуальны и для лесозаготовительной отрасли, при этом учитываются ее специфические критерии эффективности [3; 4].

Дискретные многооперационные процессы можно рассматривать как многошаговые. Решение задач оптимизации многошаговых процессов можно выполнять методом динамического программирования [9; 15]. Преимуществом данного метода является то, что он дает возможность сформулировать условия оптимальности в целом (в глобальном смысле), а недостатком становятся требования к повышенной памяти вычислительных машин. Другой метод оптимизации многошаговых процессов основан на принципе максимума Л.С. Понтрягина [14; 17] как вариационном подходе к быстродействию протеканию во времени линейных и нелинейных процессов. Следует отметить, что условия оптимальности для дискретных процессов в общем случае носят локальный характер, и полного аналога принципа максимума в многошаговых процессах не существует [9].

Как в логистике, так в кибернетике научная основа формируется на общей концептуальной основе — системном подходе: целостность системы с позиции системного анализа [5; 6]. Основной целью кибернетики как науки об управлении сложных динамических систем с обратной связью является организация их работы таким образом, чтобы результаты их функционирования были наилучшими, т. е. оптимизация систем управления. Важным моментом при этом является установление функциональной зависимости между представительной информацией и параметрами состояния системы. Сформулированное в кибернетике представление «черного ящика» как устройства, в котором выполняется определенная операция, когда знание о ее информационной структуре является необязательным, становится важным методологическим приемом построения графов связности многооперационных логистических потоков [7].

Многооперационные процессы в лесном комплексе с позиции математической статистики являются статистически детерминированными: детерминизм сопровождается сопутствующими случайными факторами природного и производственного характера.

Управление такими процессами осуществляется через дисперсию и среднее квадратичное отклонение параметров состояния.

Принцип оптимизации системы основан на максимальной синхронизации производственных операций во времени и пространстве, что возможно при минимальных значениях среднего квадратичного отклонения и дисперсии.

Технологический подход предполагает применение детального анализа производственных процессов с целью выявления точек возможного улучшения. Для этого используются методы инженерного анализа, позволяющие представить технологические процессы в формате блок-схем, что облегчает выявление узких мест и объективную оценку производительности.

Экспериментальный метод исследования включает в себя проведение натуральных экспериментов и моделирование производственных ситуаций. Решение об использовании определенных технологий и логистических схем основывается на данных, полученных в результате таких экспериментов. Моделирование, в свою очередь, базируется на математических и компьютерных методах, что позволяет просчитывать различные сценарии развития событий и их влияние на общий производственный процесс.

Кроме того, аналитический метод является неотъемлемой частью исследования, цель которого заключается в обработке и интерпретации полученных данных. В рамках этого метода применяются различные способы статистического анализа — от простых величин, таких как средние значения, до более

сложных методов, таких как регрессионный анализ и анализ временных рядов.

В совокупности описанные методы исследования позволяют не только провести детальный анализ существующих производственных процессов и логистических схем, но и разработать рекомендации по их оптимизации. Это, в свою очередь, способствует повышению общей эффективности лесозаготовительного производства и обеспечению его устойчивого развития с учетом требований современного рынка и экологических стандартов.

Методы исследования. Технологический процесс в лесозаготовительной промышленности включает в себя такие основные этапы, как валка деревьев, трелевка, обрезка сучьев, раскряжевка, погрузка лесоматериалов на транспорт, их перевозка, сортировка, производство пиломатериалов и др. На рынке лесного машиностроения этот набор операций реализуется при помощи разнообразной техники. Сложный производственный процесс заготовки древесины является многооперационным, представляя собой совокупность различных технологических операций. В лесном машиностроении для каждой операции используется определенный тип машин, средств и оборудования, которые классифицируются в зависимости от вида производственного процесса. Сюда входят бензопилы, валочные и валочно-пакетирующие машины, трелевочные тракторы, многооперационные машины, сортиментовозы, скиддеры, процессоры, рубительные машины для измельчения отходов, лесовозные автомобили, лесоперерабатывающие станки и мн. др. Таким образом, каждая технологическая операция имеет свое специализированное оборудование.

Множество композиций технологических операций, реализуемых соответствующей лесотехникой, формирует весь путь движения лесоматериалов из лесосеки до конечного потребителя. С позиции логистики — это материальный поток, воспринимаемый как единое целое в определенном интервале производственного времени и расстояния; в системном анализе это множественный объект, состояние которого определяется связями между элементами и целевой функцией.

При исследовании системы решается задача анализа, понимания поведения и синтеза, создания нужной системы и ее управление [7; 8]. В современном представлении системный анализ разрабатывает методы и модели анализа и синтеза систем. Особенно важным становится построение гармоничных систем, когда оптимизацией становится компромисс учета совместного влияния всех факторов, как положительных, так и отрицательных [7]. Свойством гармонии обладает особый класс систем, у которых функциональная связность элементов обладает свойствами группы, которая формулирует условие симметрии-асимметрии элементов относительно единицы группы [16].

В многооперационных системах наряду с технологическим временем и пространством, формирующими параметры операций, имеют место функциональные время и пространство

производственной связности операций и процесса в целом [7].

Методология системного анализа позволяет построить математическую модель гармонической связности операций как интегрируемой системы отношений в функциональном технологическом пространстве-времени и сформулировать условие оптимизации целевой функции.

Результаты исследования. Композиция технических операций определяет динамическую структуру лесозаготовительного потока, каждой операции соответствует свое дискретное пространство-время протекания.

В этой связи классическое представление производительности во времени пути движения [19; 20] должно быть дополнено производительностью на расстояние.

Формула расчета производительности операции во времени имеет вид:

$$P_{ij} = V_j / t_j, j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

здесь P_{ij} — объем производства (перемещение) лесоматериалов в единицу времени; V_j — объем производства (перемещение) лесоматериалов; t_j — время выполнения операции производства (перемещения).

Производительности операции во времени можно поставить в соответствие функциональное время производства (перемещения) 1 м^3 древесины:

$$q_{ij} = V_j^{-1} t_j, \quad (2)$$

и записать между ними гиперболическую связь:

$$P_{ij} q_{ij} = 1. \quad (3)$$

Отметим, что функциональная связность операций в потоке определяется временем производства (перемещения) 1 м^3 материала древесины.

Суммарное функциональное время производства (перемещения) 1 м^3 лесоматериалов операциями в лесозаготовительном потоке равно:

$$Q_t = \sum_{j=1}^n q_j, \quad (4)$$

оно определяет производительность потока в функциональном времени связности всех операций:

$$P_{ij} = n / Q_t. \quad (5)$$

Запишем коэффициент:

$$K_t = P_{ij} / \sum_{j=1}^n P_{ij}, \quad (6)$$

который позволяет давать количественную оценку производственной и технологической эффективности потока как интегрированной в функциональном времени единой динамической структуры.

Аналогичные построения выполним для пространственного перемещения операций. Формула для расчета производительности операции при перемещении имеет вид:

$$P_{xj} = V_j / x_j, j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (7)$$

здесь Π_{xj} — объем производства (перемещение) лесоматериалов на единицу расстояния; V_j — объем производства (перемещение) лесоматериалов; x_j — расстояние выполнения операции производства (перемещения).

Производительности операции на расстоянии можно поставить в соответствие функциональное расстояние производства (перемещения) 1 м³ древесины:

$$q_{xj} = V_j^{-1} x_j, \quad (8)$$

и записать между ними гиперболическую связь:

$$\Pi_{xj} q_{xj} = 1. \quad (9)$$

Суммарное функциональное расстояние производства (перемещения) 1 м³ лесоматериалов операциями в лесозаготовительном потоке равно:

$$Q_x = \sum_{j=1}^n q_{xj}, \quad (10)$$

оно определяет производительность потока в функциональном расстоянии связности всех операций:

$$\Pi_{xj} = n / Q_x. \quad (11)$$

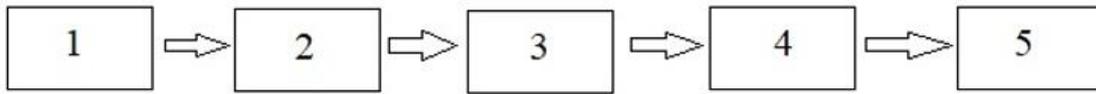


Рис. 1. Схема движения лесозаготовительных операций потока древесины из лесосеки до потребителя: 1 — харвестер, 2 — форвардер; 3 — лесовоз; 4 — пилорама; 5 — потребитель

Технологические характеристики техники операций представлены в табл. 1.

Производительность харвестера находится по формуле:

$$\Pi_{ха} = V_x f_1 f_2 / (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7), \quad (13)$$

где V_x — объем хлыста; t_1 — время наведения ЗСУ на дерево; t_2 — время захвата дерева; t_3 — время срезания; t_4 — время подтаскивания дерева к машине; t_5 — время раскряжевки; t_6 — время смены рабочей стоянки; t_7 — время протаскивания через ножевую головку; f_1 — коэффициент использования рабочего времени; f_2 — коэффициент использования грузоподъемности.

Функциональное время производства 1 м³ сортимента харвестером можно оценить формулой:

$$t^* = (V_x f_1 f_2)^{-1} (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7), \quad (14)$$

Производительность форвардера рассчитывается по формуле:

$$\Pi_{ф} = M / (t_1 + t_2 + t_3 + t_4), \quad (15)$$

где M — рейсовая нагрузка; t_1 — время формирования воя; t_2 — время грузового хода; t_3 — время холостого хода; t_4 — время разгрузки.

Рейсовую нагрузку можно записать в виде:

$$M = V_x n, \quad (16)$$

тогда:

$$\Pi = V_x / t_x, \quad (17)$$

Запишем связь формул (1) и (7):

$$\Pi_{ij} = \Pi_{xj} v_j, \quad (11, a)$$

v_j — скорость выполнения операции.

По аналогии с (6) запишем коэффициент:

$$K_x = \Pi_{xj} / \sum_{j=1}^n x_j, \quad (12)$$

который позволяет давать количественную оценку производственной и технологической эффективности потока как интегрированной в функциональном пространстве единой динамической структуры.

Выполним исследование технической эффективности трех вариантов лесозаготовительного производства как логистических потоков доставки лесоматериалов из лесосек до потребителя. Логистическим операциям ставится в соответствие техника, выполняющая эти операции, т. е. техника — операции логистического потока.

На рис. 1 представлена схема первого варианта движения лесозаготовительных операций потока древесины (техники) из лесосеки до потребителя.

где время цикла транспортировки одного хлыста:

$$t_x = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4) / n, \quad (18)$$

Функциональное время, затрачиваемое на перемещение 1 м³ древесины, равно:

$$t^* = t_x / V_x. \quad (19)$$

Для перемещения заготовленной древесины на рынке лесного машиностроения созданы специализированные лесовозные автомобили марок МАЗ, КамАЗ, «Урал», ЗИЛ и других. К ним предлагаются полуприцепы, прицепы и т. д. Комбинация лесовозного автомобиля с прицепом или полуприцепом именуется автопоездом.

Эффективность работы лесовозных автомобилей можно вычислить по следующей формуле [11]:

$$\Pi_{л} = V / t = V_x n / t, \quad (20)$$

или:

$$\Pi_{л} = S_x n L / t = S_{xn} U, \quad (21)$$

где объем вывозимой древесины:

$$V = b h l n k, \quad (22)$$

где b — расстояние между стойками коника; h — полезная высота стоек коника; l — длина сортимента (хлыста); n — число сортиментов (хлыстов); k — коэффициент плотности упаковки; время грузового и холостого хода:

$$t = 2 s / v, \quad (23)$$

где s — расстояние вывозки; v — скорость лесовозного автомобиля.

Функциональное время, приходящееся на вывозку 1 м³ древесины, равно:

$$t_1 = 2s / Vv, \quad (24)$$

Производительность пилорамы:

$$P_p = dnV / l, \quad (25)$$

d — посылка на один оборот; n — число оборотов; l — длина бревна; V — объем бревна.

Результаты аналитического расчета по предлагаемой математической модели представлены в табл. 2.

На рис. 2 представлена схема второго варианта движения лесозаготовительных операций потока древесины из лесосеки до потребителя

Таблица 1. Технологическая характеристика техники

	Харвестер	Форвардер	Лесовоз	Пилорама
Производительность, М ³ / час // М ³ /км	9 // 1,8	9 // 1,8	9 // 0,3	8 // 80

Таблица 2. Техническая эффективность лесозаготовительной системы операций: харвестер, форвардер, лесовоз, пилорама

Производительность в функциональном времени, П _т , м ³ /ч	Производительность в функциональном пространстве, П _х , м ³ /км	Коэффициент технологической эффективности в функциональном времени потока	Коэффициент технологической эффективности в функциональном пространстве потока
9	1	0,26	0,01

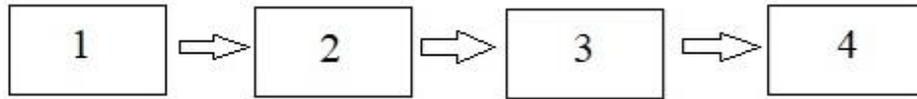


Рис. 2. Схема второго варианта движения лесозаготовительных операций потока древесины из лесосеки до потребителя: 1 — харвестер; 2 — форвардер; 3 — лесовоз с прицепом; 4 — потребитель, ЦБК

На рис. 3 представлена схема третьего варианта движения лесозаготовительных операций потока древесины из лесосеки до потребителя.

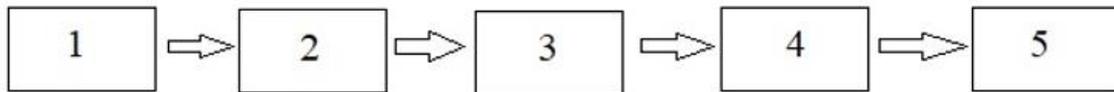


Рис. 3. Схема третьего варианта движения лесозаготовительных операций потока древесины из лесосеки до потребителя: 1 — харвестер; 2 — форвардер; 3 — лесовоз; 4 — ж/д; 5 — потребитель, ЦБК

Таблица 3. Техническая эффективность лесозаготовительной системы операций: харвестер, форвардер, лесовоз, ЦБК

Производительность в функциональном времени, П _т , м ³ /ч	Производительность в функциональном пространстве, П _х , м ³ /км	Коэффициент технологической эффективности в функциональном времени потока	Коэффициент технологической эффективности в функциональном пространстве потока
6	0,44	0,33	0,2

Таблица 4. Техническая эффективность лесозаготовительной системы операций: харвестер, форвардер, лесовоз, ждт, ЦБК

Производительность в функциональном времени, П _т , м ³ /ч	Производительность в функциональном пространстве, П _х , м ³ /км	Коэффициент технологической эффективности в функциональном времени потока	Коэффициент технологической эффективности в функциональном пространстве потока
5,3	2,7	0,24	0,07

Заключение. Многооперационные потоки в рамках системы «лес – потребитель» являются по своей природе стохастическими, что распространяется и на функциональное время в динамических связях. Стационарный случайный процесс можно охарактеризовать статистическим средним и дисперсией [10; 12; 13; 18]. Среднее функциональное

время перемещения единицы предмета труда следует рассчитывать с учетом дисперсии отклонений от среднего значения:

$$t = t_c + t^* \quad (26)$$

здесь:

$$t_c = \sum_{i=1}^m t_i / m, \quad (27)$$

после стохастического осреднения:

$$t_s^2 = t_c^2 (1 + t^*/t_c)^2, \quad (28)$$

получаем:

$$t_s = t_c (1 + t_{c^*}^2 / t_c^2)^{1/2}, \quad (29)$$

при $t_{c^*}^2 / t_c^2 \ll 1$ получаем линейное представление влияния стохастичности:

$$t_s = t_c \left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_{c^*}^2}{t_c^2} \right) = t_c + t_{c^*}, \quad (30)$$

здесь t_c — среднее функциональное время производства (перемещения) единицы труда в процессе; t^* — отклонение от среднего; t_{c^*} — среднее квадратичное отклонение; t_s — функциональное время с учетом статистических флуктуаций; t_{c^*} — стохастическая составляющая функционального времени; m — число связанных операций в процессе.

Видно, что стохастичность потока приводит к увеличению значения функционального времени.

Построенные формулы можно применить для оценки стохастической характеристики каждой операции, в этом случае m — объем выборки, и статистики производственных расстояний путем замены $t \rightarrow x$.

С учетом данных представлений производительность многооперационного потока можно оценить по формуле:

$$\Pi_s = 1/t_s = 1/(t_c + t_{c^*}), \quad (31)$$

или:

$$\Pi_s = 1/[(1 + t_{c^*}/t_c)t_c], \quad (32)$$

и:

$$\Pi_s = \Pi_c / (1 + t_{c^*}/t_c), \quad (33)$$

при $t_{c^*}/t_c \ll 1$ получаем:

$$\Pi_s = \Pi_c (1 - t_{c^*}/t_c), \quad (34)$$

здесь производительность процесса по среднему функциональному времени:

$$\Pi_c = 1/t_c, \quad (35)$$

Снижение производительности системы операций в результате стохастичности процесса в линейном представлении составляет:

$$\Pi_{c^*} = \Pi_c t_{c^*} / t_c, \quad (36)$$

Видно, что статистические колебания функционального времени многооперационного процесса приводят к снижению его производительности в целом.

Рассмотрим влияние стохастичности функционального времени операций на формирование функционального времени всего процесса, для этого выполним статистическое осреднение в i -й операции:

$$t_i = t_{ci} + t_{si}, \quad (37)$$

здесь:

$$t_{ci} = \sum_{j=1}^n t_j / n, \quad (38)$$

n — объем выборки, число операций $i=1, 2, \dots, m$, после стохастического осреднения:

$$t_{si}^2 = t_{ci}^2 (1 + t_{si}^*/t_{ci})^2, \quad (39)$$

получаем:

$$t_{si} = t_{ci} (1 + t_{c^*i}^2 / t_{ci}^2)^{1/2}, \quad (40)$$

при $t_{c^*i}^2 / t_{ci}^2 \ll 1$ получаем линейное представление влияния стохастичности на функциональное время операции:

$$t_{si} = t_{ci} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{t_{c^*i}^2}{t_{ci}^2} \right) = t_{ci} + t_{c^*i}, \quad (41)$$

в этих условиях производительность операции равна:

$$\Pi_{si} = 1/t_{si} \quad (42)$$

или:

$$\Pi_{si} = \Pi_{ci} (1 - t_{c^*i}/t_{ci}), \quad (42)$$

видно, что стохастичность в каждой операции приводит к снижению ее производительности.

Общее функциональное время с учетом стохастичности операций равно:

$$t_s = \sum_{i=1}^m (t_{ci} + t_{c^*i}), \quad (43)$$

тогда среднее время на одну операцию:

$$t_{sc} = \left[\sum_{i=1}^m (t_{ci} + t_{c^*i}) \right] / m, \quad (44)$$

или:

$$t_{sc} = t_{cc} + t_{c^*c}, \quad (45)$$

здесь среднее функциональное время:

$$t_{cc} = \left[\sum_{i=1}^m t_{ci} \right] / m, \quad (46)$$

и стохастическое среднее:

$$t_{c^*c} = \left[\sum_{i=1}^m t_{c^*i} \right] / m. \quad (47)$$

На основании полученных выражений запишем формулу для производительности логистического потока:

$$\Pi_{sc} = 1/t_{sc} = 1/(t_{cc} + t_{c^*c}), \quad (48)$$

или:

$$\Pi_{sc} = 1/[t_{cc} (1 + t_{c^*c}/t_{cc})], \quad (49)$$

или:

$$\Pi_{sc} = (1 - t_{c^*c}/t_{cc}) / t_{cc}, \quad (50)$$

и:

$$\Pi_{sc} = \Pi_{cc} (1 - t_{c^*c}/t_{cc}), \quad (51)$$

где:

$$\Pi_{cc} = 1/t_{cc}. \quad (52)$$

Для системы машин, последовательно выполняющих операции в стохастическом режиме, можно записать среднее функциональное время в виде:

$$t_{*n} = \sum (t_{cj} + t_{sj}) / n, \quad (53)$$

или:

$$t_{*n} = \sum t_{ci} \left(1 + \sum t_{si} / \sum t_{ci} \right) / n, \quad (54)$$

и:

$$\left[\left(1 + \sum t_{si} / \sum t_{ci} \right) \right]^{-1} \approx 1 - \sum t_{si} / \sum t_{ci}. \quad (56)$$

Исследования показывают негативное влияние стохастичности функционального времени на производительность лесных машин и подчеркивают значимость синхронизации процессов.

Представлена математическая модель целостной связности технических операций лесозаготовительного производства, объединяющая системный, кибернетический и логистический

подходы. В функциональном пространстве-времени протекания материального потока от лесосеки до потребителя построены наиболее информативные параметры его представления и критерии эффективности, позволяющие давать количественную оценку выбираемым логистическим системам. Разработанная математическая модель позволяет делать обобщения для других экономических систем, таких как потоковое производство, разгрузка судов и др.

оснащение современных лесозаготовок. СПб.: Проф-Информ, 2005. 344 с.

20. Матвейко А.П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства. Минск: Техноперспектива, 2006. 446 с.

References

- Литература*
1. Гаджинский А.М. Логистика. М.: Маркетинг, 1999. 228 с.
 2. Логистика / под ред. Б.А. Аникина. М.: Инфра-М, 2000. 352 с.
 3. Проценко О.Д., Проценко И.О. Логистика и управление цепями поставок - взгляд в будущее. Макроэкономический аспект. М.: Дело, 2012. 191 с.
 4. Джонсон С.Д. Современная логистика. М.: Вильямс, 2009. 624 с.
 5. Uusitalo J. A Framework for CTL Method-Based Wood Procurement Logistics // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 37-46.
 6. Karanta I., Jokinen O., Mikkola T., Savola J., Bounsaythip C. Requirements for a vehicle routing and scheduling system in timber transport // Logistics in the forest sector. Helsinki: Timber Logistics Club, 2000. P. 235-251.
 7. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Соловьёв А.Н. Основы системного анализа производственных процессов. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 58 с.
 8. Гуров С.В. Теория системного анализа и принятия решения. СПб.: СПбЛТА, 2008. 144 с.
 9. Forsberg M., Frisk M., Rönnqvist M. Flow Opt - A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 101-114.
 10. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юрайт, 2020. 479 с.
 11. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. М.: Юрайт, 2021. 406 с.
 12. Каштанов В.А., Энатская Н.Ю. Случайные процессы. М.: Юрайт, 2021. 156 с.
 13. Трухан А.А., Кудряшев Г.С. Теория вероятностей в инженерных приложениях. СПб.: Лань, 2021. 368 с.
 14. Казеев И.М., Казеева В.И. Имитационное моделирование и оптимизация логистических систем // Науч. труды препод. Московской акад. экономики и права. 2014. Вып. 28. С. 68-79.
 15. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., Малинецкий Г.Г. Некоторые аспекты динамической теории графов // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. № 55 (9). С. 1623-1629.
 16. Фор Р., Кофман А., Дени-Папен М. Современная математика / пер. с фр. Е.В. Гайдукова, Н.Н. Родман. М.: Мир, 1966. 271 с.
 17. Lendermann P., McGinnis L.F., Mönch L., Schirrmann A. Grand challenges for discrete event logistics systems // Informatik Spektrum. 2010. № 33 (6). P. 663-668.
 18. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.
 19. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Галактионов О.И. Техническое
 1. Gadzhinskij A.M. Logistics. M.: Marketing, 1999. 228 p.
 2. Logistics / pod red. B.A. Anikina. M.: Infra-M, 2000. 352 p.
 3. Procenko O.D., Procenko I.O. Logistics and supply chain management - a look into the future. Macroeconomic aspect. M.: Delo, 2012. 191 p.
 4. Dzhonson S.D. Modern logistics. M.: Vil'yams, 2009. 624 p.
 5. Uusitalo J. A Framework for CTL Method-Based Wood Procurement Logistics // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 37-46.
 6. Karanta I., Jokinen O., Mikkola T., Savola J., Bounsaythip C. Requirements for a vehicle routing and scheduling system in timber transport // Logistics in the forest sector. Helsinki: Timber Logistics Club, 2000. P. 235-251.
 7. Bazarov S.M., Belen'kij Yu.I., Solov'yov A.N. Fundamentals of system analysis of production processes. SPb.: SPbGLTU, 2018. 58 p.
 8. Gurov S.V. Theory of system analysis and decision making. SPb.: SPbLTA, 2008. 144 p.
 9. Forsberg M., Frisk M., Rönnqvist M. Flow Opt - A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry // International Journal of Forest Engineering. 2005. № 16 (2). P. 101-114.
 10. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics. M.: Yurajt, 2020. 479 p.
 11. Gmurman V.E. A guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics. M.: Yurajt, 2021. 406 p.
 12. Kashtanov V.A., Enatskaya N.Yu. Random processes. M.: Yurajt, 2021. 156 p.
 13. Truhan A.A., Kudryashev G.S. Probability theory in engineering applications. SPb.: Lan', 2021. 368 p.
 14. Kazeev I.M., Kazeeva V.I. Simulation modeling and optimization of logistics systems // Nauch. trudy prepod. Moskovskoj akad. ekonomiki i prava. 2014. Vyp. 28. P. 68-79.
 15. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malineckij G.G. Some aspects of dynamic graph theory // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2015. № 55 (9). P. 1623-1629.
 16. For R., Kofman A., Deni-Papen M. Modern Mathematics / per. s fr. E.V. Gajdukova, N.N. Rodman. M.: Mir, 1966. 271 p.
 17. Lendermann P., McGinnis L.F., Mönch L., Schirrmann A. Grand challenges for discrete event logistics systems // Informatik Spektrum. 2010. № 33 (6). P. 663-668.
 18. Kolmogorov A.N. Probability theory and mathematical statistics. M.: Nauka, 1986. 534 p.
 19. Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Galaktionov O.I. Technical equipment of modern logging. SPb.: Prof-Inform, 2005. 344 p.
 20. Matvejko A.P. Technology and equipment of logging production. Minsk: Tekhnoperspektiva, 2006. 446 p.