



УДК 625.8:630

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЕСНОГО СОРТИМЕНТОПОДБОРЩИКА

С.М. Базаров¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAW-5363-2020](https://orcid.org/0000-0003-1605-5834),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Ю.И. Беленький¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAХ-2680-2020](https://orcid.org/0000-0002-4170-3664),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>

С.А. Узрюмов¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Ф.В. Свойкин¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

В.Ф. Свойкин², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, литер У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: s.bazarow@yandex.ru, 2000zalom@gmail.com, ugr-s@yandex.ru, svoikin_fv@mail.ru

²Сыктывкарский лесной институт – филиал Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия, 167982; e-mail: svoikinvf@mail.ru

Аннотация. Одним из перспективных направлений повышения производительности в лесозаготовительном производстве является системный подход к уточнению технологической эффективности колесного сортиментоподборщика на основе построения единой технологической связности всех выполняемых операций от первой «загрузка» до конечной «начало разгрузки». Применение системного анализа при оценке парка лесозаготовительной техники или его элементов позволяет формировать связные и гибкие технологические процессы как единые пространственно-временные производственные структуры. В основе единой связности выполняемых дискретных операций (движение машины по волоку от пачки к пачке, установка манипулятора в рабочее положение, перемещение захвата в сторону сортимента, захват сортимента на земле, его сортировка, выравнивание пачки, перемещение пачки в грузовой отсек, укладка сортимента в грузовой отсек, установка манипулятора в транспортное положение, движение по волоку) с позиции теории систем лежат представление функционального времени производства единицы продукции (1 м³ древесины) операцией и его суперпозиция по всем производственным операциям. Суперпозиция выстраивает единое функциональное время целостности (интегрированности) выполняемых операций, в котором эффективно осуществляется целевая функция производственной структуры. С позиции системного анализа проведено аналитическое исследование определения эффективной производительности в функциональном времени производственного процесса колесного сортиментоподборщика. В статье изучен хронометраж работы колесного сортиментоподборщика Ponsse Buffalo в наиболее типичных природно-производственных условиях арендной базы АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» (средняя тайга, Республика

Коми). Предложена методика расчета общей производительности колесного сортиментоподборщика при выполнении всех операций (загрузки, складирования, транспортировки до места разгрузки). Показана возможность применения предложенной методики для оценки эффективности работы колесных сортиментоподборщиков в части реализации прогнозирования общей производительности лесной машины в функциональном времени производства единицы продукции. Методика позволяет выбрать направления повышения производительности труда за счет синхронизации функционального времени выполнения всех производственных операций.

Для цитирования: Базаров С.М., Бельский Ю.И., Угрюмов С.А., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф. Системный анализ технологической эффективности колесного сортиментоподборщика // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 116–129. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

Ключевые слова: колесный сортиментоподборщик, системный анализ, технологическая эффективность, технологические операции, функциональное время, производительность.

Введение

В настоящее время колесный сортиментоподборщик (КС) – основная лесная машина для первичной вывозки древесины при сортиментной заготовке как в Европейском союзе, особенно в Скандинавских странах [13–18, 20, 21], так и в России [1, 6, 7].

Аналізу технологической эффективности КС посвящен ряд работ [8, 11, 12], однако на данный момент вопрос технологической эффективности КС с позиции системного анализа раскрыт и исследован недостаточно.

В связи с потребностью ритмичных поставок древесины потребителю и отсутствием традиционных сезонов ее заготовки по климатическим факторам [10], вопрос системного анализа технологической эффективности КС становится актуальным.

Стоит отметить, что попытки систематизировать анализ технологического процесса парка лесозаготовительной техники для улучшения общей эффективности фазы технологии процесса лесозаготовок постоянно предпринимаются ведущими фирмами-производителями отрасли: разрабатываются и систематически внедряются программы передачи данных с лесозаготовительных машин напрямую потребителю с возможностью последующего анализа. Примерами могут служить TimberOffice™ Data Transfer (TODT) от John Deere, MaxiFleet™ от Komatsu Forest, Opti Progress Control™ от Ponsse, Dasa 5™ от Ferronordic. Активное внедрение в России этих систем иностранными компаниями на данный момент затруднено или невозможно из-за ряда факторов. Многие программы, например MaxiS от Komatsu Forest, зачастую являются дополнительным дорогостоящим программным обеспечением и обладают сложным для восприятия и интерпретации интерфейсом, применяют неадаптированные для нашей страны алгоритмы, при этом отсутствует межплатформенность их использования. Это открывает возможность реализации математического аппарата системного анализа технологической эффективности парка лесных машин (в том числе КС) в межплатформенном программном обеспечении отечественного производства.

Для повышения производительности труда путем цифровизации транспортно-погрузочных операций и увеличения скорости их выполнения необходим переход к более детальному раскрытию динамики пространственно-временной структуры представления технологического процесса: переход от среднестатистической математической модели к рассмотрению пространственно-временной структуры с позиции системного анализа. Это приводит к изменению среднестатистической параметрической оценки производительности на раскрытие состояния функционального пространства–времени, в котором происходят динамически связанные подоперации (к чему уже технически готовы современные аппаратные решатели многооперационных лесозаготовительных машин).

Целью исследования является повышение производительности труда на основе более информативного описания производственного процесса путем раскрытия дифференциально-интегрированной картины единого функционального пространства–времени протекания операции «загрузка» КС как системы связанных подопераций для последующей оценки возможности реализации полученных результатов в унифицированном межплатформенном программном обеспечении для сокращения времени перемещения лесоматериалов от места валки к погрузочному пункту.

Следуя традиционным понятиям формирования процесса [3], системный подход к повышению общей эффективности работы лесозаготовительной техники (в частности КС) является актуальным не только для комплексов лесных машин, но и для их отдельных операций. При этом на данный момент предполагается замена среднестатистической оценки операций более информационно насыщенной картиной их глубокой интегрированной связности. Математический аппарат системного анализа [3] технологической эффективности КС приводит к необходимости связать дифференцированный и интегрированный анализы от начальной подоперации «загрузка» до конечной «разгрузка» в единую динамическую картину технологического процесса.

Объекты и методы исследования

В настоящее время расчет производится согласно среднестатистическому представлению о протекании технологического процесса. Для повышения производительности труда необходим переход к более детальному раскрытию динамики пространственно-временной структуры процесса. Используем формулу часовой производительности КС ($\Pi_{\text{ч}}$, м³/ч) [5, 9]:

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{3600V_{\text{п}}\varphi_2}{T_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где 3600 – множитель для перевода производительности в часы; $V_{\text{п}}$ – объем пачки сортиментов, м³; φ_2 – коэффициент использования расчетного объема пачки сортиментов (0,8...0,9); $T_{\text{ц}}$ – время цикла трелевки пачки сортиментов, с.

Время цикла трелевки пачки леса согласно среднестатистическому представлению о протекании технологического процесса [5, 9]:

$$T_{\text{ц}} = T_A + T_B + T_C + \dots + T_I + T_K + T_n,$$

где $T_A, T_B, T_C, \dots, T_I, T_K, T_n$ – время погрузки пачки сортиментов в грузовой отсек, с; A, B, C, \dots, I, K, n – индексы соответствующей подоперации.

Время погрузки пачки сортимента:

$$T_n = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \dots + p_n,$$

где p_1, \dots, p_n – время технологических операций, с.

Время технологических операций:

$$p_n = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10},$$

где t_1 – движение машины по волоку от пачки к пачке, с; t_2 – установка манипулятора в рабочее положение, с; t_3 – перемещение захвата в сторону сортимента, с; t_4 – захват сортимента на земле, с; t_5 – сортировка сортимента, с; t_6 – выравнивание пачки, с; t_7 – перемещение пачки в грузовой отсек, с; t_8 – укладка сортимента в грузовой отсек, с; t_9 – установка манипулятора в транспортное положение, с; t_{10} – движение по волоку, с.

На практике количественные показатели схем разработок лесосек определяются конкретными условиями. В зависимости от лесорастительных условий применяется технология, соответствующая установленному способу рубок и трелевки древесины, среднему объему хлыста, запасу древесины на лесосеке, принятой технологии лесосечных работ, схеме размещения волоков, лесовозных дорог, усов, погрузочных пунктов, стоянок машин, объектов обслуживания, площади, на которой должны быть сохранены подрост и тонкомер и процент их сохранности, состоянию почвы. Важным фактором, определяющим количественные показатели, является не только выбор комплекса лесных машин, но и оптимизация их функциональной связанности с позиции системного анализа.

Оптимизация работы [2, 4] зависит от синхронизации операций в функциональном пространстве–времени комплекса, определяемого целевой функцией, выстраивающей функциональное пространство времени связности технологических операций как единый интегрированный процесс [3].

В ходе эксперимента произведен хронометраж работы КС Ponsse Buffalo 8W [19, 22]. Данные были собраны в процессе работы лесной машины на Бортомском участке Южного отделения АО «Монди Сыктывкарский лесопромышленный комплекс» в квартале № 561, на делянке № 3 Куратовского участкового лесничества в средней тайге Республики Коми. Исследования проводились в смешанном елово-березовом лесу (породный состав 4Е4Б1С1П); тип леса – черничный; обоснование выбора условий: наиболее типичные природно-производственные условия арендной базы предприятия.

При изучении основных параметров КС учитывают производительность технологической линии лесных машин и качество сортировки вырабатываемых сортиментов (выход деловой древесины). В транспортных задачах на передний план выходит производительность, определяемая выбранными схемами работ и системой машин. Конкретными характеристиками изучаемого процесса в зависимости от решаемых задач могут быть: загрузка машин по времени, вероятность их простоя по различным причинам, объем транспортной работы, процент выхода определенных лесоматериалов, доля отходов и др.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно формуле (1) работа КС определяется множеством дискретных операций, характеризующихся временем их выполнения. Сортименты могут

также в процессе обработки сортироваться на пасеке. Технологическая схема работы колесного сортиментоподборщика при проведении исследований (порядок и направление сортировки и укладки сортиментов в грузовой отсек) представлена на рис. 1.

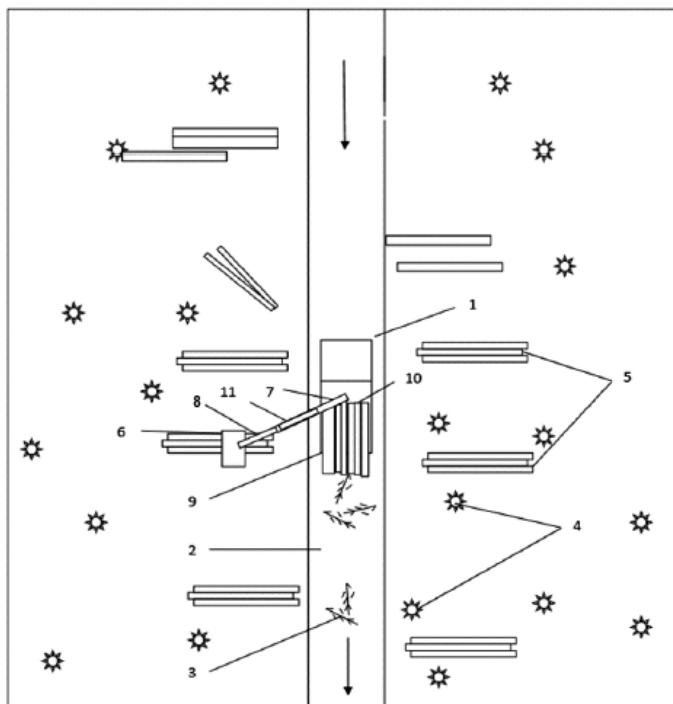


Рис. 1. Схема работы колесного сортиментоподборщика: 1 – колесный сортиментоподборщик; 2 – волок; 3 – порубочные остатки; 4 – подсад; 5 – сортимент; 6 – грейферный захват; 7 – стрела; 8 – телескопическое звено; 9 – грузовой отсек; 10 – защитная перегородка; 11 – рукоять

Fig. 1. Operation diagram of the wheeled forwarder: 1 – wheeled forwarder; 2 – skidding track; 3 – felling residues; 4 – undergrowth; 5 – timber assortments; 6 – grapple tong; 7 – hinge boom; 8 – boom; 9 – cargo compartment; 10 – protective shield; 11 – dipper stick

КС движется в направлении указательной стрелки по прорубленному валочно-сучкорезно-раскряжевочной машиной (ВСРМ) пасечному волоку.

Перемещая захват манипулятора *б* в требуемом направлении, используя движения подъема стрелы, телескопического звена стрелы и поворота колонны манипулятора и одновременно поворачивая захват в положение, необходимое для загрузки, КС осуществляет захват сортиментов из средней части пачки. При этом между челюстями грейфера и сортиментами нужно оставлять свободное пространство, которое обеспечивается вывешиванием захвата на небольшом расстоянии от штабеля сортиментов. Необходимо следить за тем, чтобы в механизм не попадали лесосечные отходы. Следует одновременно захваты-

вать и поднимать пачку сортиментов. Для перемещения груза на КС используется движение поворота колонны манипулятора и подъема его стрелы. При выполнении этой операции требуется оставлять свободное пространство между сортиментами и стойками грузового отсека, равное приблизительно 0,5 м. При необходимости на этом этапе можно использовать «телескоп» δ . Во время переноса сортиментов в грузовой отсек их поворачивают до тех пор, пока тот конец пачки сортиментов, который будет уложен к защитной перегородке, не будет нацелен на основание манипулятора. Уже завершая перемещение пачки над грузовым отсеком, следует с помощью рукояти стрелы начинать перемещать сортименты по направлению к защитной перегородке. Благодаря этому приему, движение будет более плавным. Необходимо стремиться переносить сортименты в нужное место без остановки. Укладывают сортименты у стоек или, при наличии свободного пространства, по центру грузового отсека. Сортименты должны лежать вдоль, а их концы располагаться у защитного экрана. Если сортименты были тщательно погружены на лесосеке, то их будет легко штабелировать на площадке складирования и хранения лесоматериалов. При укладке сортиментов на грузовой отсек необходимо раскрывать захват медленно, одновременно поднимая его. Это поможет не допустить укладки сортиментов крест-накрест. Если концы сортиментов, удерживаемые захватом, не выровнены, то можно слегка стукнуть пачкой о защитный экран, убедившись, что пачка находится в горизонтальном положении. Необходимо удерживать захват немного выше лежащих сортиментов. Стоит раскрывать его немного, прежде чем концы сортиментов коснутся экрана, и подтягивать пачку движением рукояти стрелы. Обычно этого движения достаточно, чтобы выровнять концы большинства сортиментов. Часто перед окончанием процесса выравнивания оператор не прерывает движение рукояти стрелы в направлении защитного экрана, что позволяет продолжить выравнивание, быстро раскрыв и закрыв захват.

Стоит отметить, что операторы-профессионалы, имеющие большой опыт работы на КС, выравнивают концы сортиментов, не прерывая движения манипулятора. При погрузке завершающих сортиментов в грузовой отсек необходимо поместить эту пачку по центру, не раскрывая захват. При перемещении КС требуется следить за тем, чтобы захват манипулятора не касался гусениц противоскольжения или колесного оборудования. Сразу после заполнения грузового отсека необходимо надежно зафиксировать захват в задней части грузового отсека. Это гарантирует, что манипулятор не начнет перемещаться, даже если КС передвигается по пересеченной местности. Более того, центр тяжести лесной машины займет самое низкое из возможных положений.

В зависимости от лесоматериала, лежащего на пасеке, захватываются или все сортименты (вся пачка), или только лесоматериал определенного сорта. После захвата сортимент с пасеки подтаскивается с помощью телескопа (если это необходимо) к КС с таким расчетом, чтобы в процессе работы грузоподъемная сила крана соответствовала тоннажу поднимаемого леса. После этого пачка сортиментов перемещается в грузовой отсек.

На основании совокупности данных о множестве остановок КС и выполняемых на каждой остановке технологических операциях, описанных выше, была построена схема затрат времени КС (рис. 2), которая отражает взаимосвязь производственных операций.

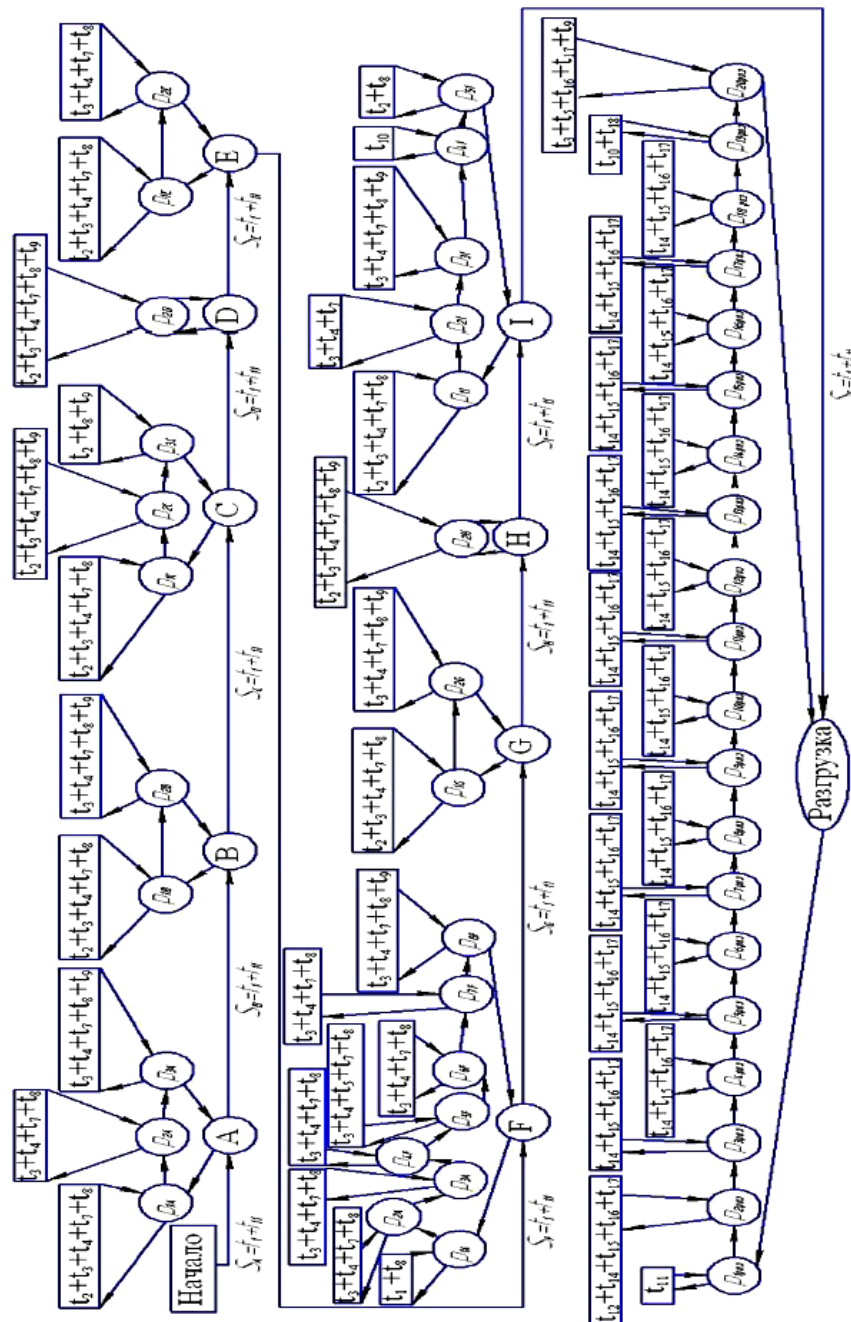


Рис. 2. Схема перемещения по лесосеке и затраты времени и затраты колесного сортировподборщика
 Fig. 2. Diagram of movement along the cutting area and time consumption of the wheeled forwarder

Представленная на рис. 2 дискретная схема производственных операций описывает позиции КС и количество выполняемых им операций.

Для дальнейших расчетов введем следующие обозначения: Π_{ij} – производительность КС на i -й стоянке при выполнении j -й операции на этой стоянке: $i = A, B, C, \dots, I$ – номер стоянки, $j = 1-8$ – количество операций на стоянке.

Пренебрежем значением перевода производительности в часы 3600 и коэффициентом использования рабочего времени ϕ_2 для построения аналитической модели производительности.

С учетом введенных обозначений производительность операций загрузки принимает следующий вид:

$$\Pi_{ij} = \frac{V_{ij}}{t_{ij}}. \quad (2)$$

Как следует из рис. 2, на стоянке A (C) КС выполняет 3 операции. Определяем производительность каждой из них (Π_{A1} , Π_{A2} , Π_{A3}) при работе на стоянках A (C):

$$\Pi_{A1} = \frac{V_{A1}}{t_{A1}}; \Pi_{A2} = \frac{V_{A2}}{t_{A2}}; \Pi_{A3} = \frac{V_{A3}}{t_{A3}},$$

где $t_{A1} = \sum_{j=1}^3 t_{Aj}$, $t_{A2} = \sum_{j=2}^3 t_{Aj}$, $t_{A3} = \sum_{j=3}^3 t_{Aj}$.

Согласно формуле (2), функциональное время, затраченное для производства 1 м³ древесины (τ_{A1} , τ_{A2} , τ_{A3}):

$$\tau_{A1} = \frac{t_{A1}}{V_{A1}}; \tau_{A2} = \frac{t_{A2}}{V_{A2}}; \tau_{A3} = \frac{t_{A3}}{V_{A3}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_A) на данной стоянке:

$$T_A = \sum_{j=1}^3 \frac{\tau_{Aj}}{3},$$

тогда общая производительность (Π_A) последовательно выполняемых трех операций на стоянке A :

$$\Pi_A = \frac{1}{T_A}.$$

Технологическое функциональное время (T_A^*) выполнения операций на стоянке A определяется как

$$T_A^* = T_A \sum_{j=1}^3 V_{Aj}.$$

В общем случае имеет место неравенство

$$T_A \sum_{j=1}^3 V_{Aj} \neq \frac{\sum_{j=1}^3 V_{Aj}}{\sum_{j=1}^3 t_{Aj}},$$

которое переходит в равенство при следующем условии: объем и время загрузки каждой операции одинаковые.

По аналогии с A (C) рассмотрим производительность на следующих характерных стоянках B (E , G), D (H), F , I .

Определяем производительность КС (Π_{B1} , Π_{B2}) при выполнении им каждой из двух операций на стоянках B (E , G):

$$\Pi_{B1} = \frac{V_{B1}}{t_{B1}}; \Pi_{B2} = \frac{V_{B2}}{t_{B2}},$$

где $t_{B1} = \sum_{j=1}^2 t_{Bj}$, $t_{B2} = \sum_{j=2}^2 t_{Bj}$.

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{B1} , τ_{B2}):

$$\tau_{B1} = \frac{t_{B1}}{V_{B1}}; \tau_{B2} = \frac{t_{B2}}{V_{B2}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_B) на данной стоянке:

$$T_B = \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{Bj}}{5}.$$

Тогда производительность (Π_B) на стоянке B :

$$\Pi_B = \frac{1}{T_B}.$$

Определяем производительность операции КС (Π_{D1}) при работе на стоянке D (H):

$$\Pi_{D1} = \frac{V_{D1}}{t_{D1}}.$$

Соответственно, функциональное время производства 1 м³ операции (τ_D):

$$\tau_D = \frac{t_{D1}}{V_{D1}}.$$

И функциональное время производства 1 м³ древесины (T_D) на данной стоянке равно τ_D .

Тогда производительность (Π_D) на стоянке D :

$$\Pi_D = \frac{1}{T_D} = \Pi_{D1}.$$

Определяем производительность каждой из восьми операций КС (Π_{F1} , Π_{F2} , Π_{F3} , Π_{F4} , Π_{F5} , Π_{F6} , Π_{F7} , Π_{F8}) при работе на стоянке F :

$$\Pi_{F1} = \frac{V_{F1}}{t_{F1}}; \Pi_{F2} = \frac{V_{F2}}{t_{F2}}; \Pi_{F3} = \frac{V_{F3}}{t_{F3}}; \Pi_{F4} = \frac{V_{F4}}{t_{F4}}; \Pi_{F5} = \frac{V_{F5}}{t_{F5}}; \Pi_{F6} = \frac{V_{F6}}{t_{F6}}; \Pi_{F7} = \frac{V_{F7}}{t_{F7}}; \Pi_{F8} = \frac{V_{F8}}{t_{F8}},$$

$$\text{где } t_{F1} = \sum_{j=1}^8 t_{Fj}; t_{F2} = \sum_{j=2}^8 t_{Fj}; t_{F3} = \sum_{j=3}^8 t_{Fj}; t_{F4} = \sum_{j=4}^8 t_{Fj}, t_{F5} = \sum_{j=5}^8 t_{Fj},$$

$$t_{F6} = \sum_{j=6}^8 t_{Fj}, t_{F7} = \sum_{j=7}^8 t_{Fj}, t_{F8} = \sum_{j=8}^8 t_{Fj}.$$

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{F1} , τ_{F2} , τ_{F3} , τ_{F4} , τ_{F5} , τ_{F6} , τ_{F7} , τ_{F8}):

$$\tau_{F1} = \frac{t_{F1}}{V_{F1}}; \tau_{F2} = \frac{t_{F2}}{V_{F2}}; \tau_{F3} = \frac{t_{F3}}{V_{F3}}; \tau_{F4} = \frac{t_{F4}}{V_{F4}}; \tau_{F5} = \frac{t_{F5}}{V_{F5}}; \tau_{F6} = \frac{t_{F6}}{V_{F6}}; \tau_{F7} = \frac{t_{F7}}{V_{F7}}; \tau_{F8} = \frac{t_{F8}}{V_{F8}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_F) на данной стоянке:

$$T_F = \sum_{j=1}^8 \frac{\tau_{Fj}}{8}.$$

Тогда производительность (Π_F) на стоянке F :

$$\Pi_F = \frac{1}{T_F}.$$

Определяем производительности каждой из пяти операций КС (Π_{I1} , Π_{I2} , Π_{I3} , Π_{I4} , Π_{I5}) при работе на стоянке I :

$$\Pi_{I1} = \frac{V_{I1}}{t_{I1}}; \Pi_{I2} = \frac{V_{I2}}{t_{I2}}; \Pi_{I3} = \frac{V_{I3}}{t_{I3}}; \Pi_{I4} = \frac{V_{I4}}{t_{I4}}; \Pi_{I5} = \frac{V_{I5}}{t_{I5}}.$$

$$\text{где } t_{I1} = \sum_{j=1}^5 t_{Ij}; t_{I2} = \sum_{j=2}^5 t_{Ij}; t_{I3} = \sum_{j=3}^5 t_{Ij}; t_{I4} = \sum_{j=4}^5 t_{Ij}; t_{I5} = \sum_{j=5}^5 t_{Ij}.$$

Функциональное время производства 1 м³ операций (τ_{I1} , τ_{I2} , τ_{I3} , τ_{I4} , τ_{I5}):

$$\tau_{I1} = \frac{t_{I1}}{V_{I1}}; \tau_{I2} = \frac{t_{I2}}{V_{I2}}; \tau_{I3} = \frac{t_{I3}}{V_{I3}}; \tau_{I4} = \frac{t_{I4}}{V_{I4}}; \tau_{I5} = \frac{t_{I5}}{V_{I5}}.$$

Функциональное время производства 1 м³ древесины (T_I) на данной стоянке равно:

$$T_I = \sum_{j=1}^5 \frac{\tau_{Ij}}{5}.$$

Тогда производительность (Π_I) на стоянке I :

$$\Pi_I = \frac{1}{T_I}.$$

Конечное время на получение единицы продукции для поставки потребителю (для штабеля готовой продукции) представляет производственный интерес, поэтому рассмотрим сопутствующую загрузке операцию складирования древесины в грузовой отсек КС. В этих условиях время первой операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A1} = T_{A1} + q_{A1} + q,$$

где Q_{A1} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A1} – общее время загрузки; q_{A1} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A1} = \sum_{j=1}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{Ij}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{A1}) между стоянками до разгрузки:

$$q_{A1} = \sum_{k=1}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки q :

$$q = \frac{L}{v},$$

где L – расстояние трелевки от A до места разгрузки; v – скорость КС от A до места разгрузки.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A1}^*):

$$T_{A1}^* = \frac{Q_{A1}}{V_{A1}}.$$

В соответствии с построенным алгоритмом время на второй операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A2} = T_{A2} + q_{A2} + q,$$

где Q_{A2} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A2} – общее время загрузки; q_{A2} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A2} = \sum_{j=2}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{Ij}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{A2}) между стоянками до разгрузки определяется по формуле

$$q_{A2} = \sum_{k=2}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A2}^*):

$$T_{A2}^* = \frac{Q_{A2}}{V_{A2}}.$$

В соответствии с построенным алгоритмом время второй операции на первой стоянке A (C) переходит в

$$Q_{A3} = T_{A3} + q_{A3} + q,$$

где Q_{A3} – общее время от загрузки до разгрузки; T_{A3} – общее время загрузки; q_{A3} – общее время всех переходов КС между стоянками до разгрузки; q – общее время от момента полной загрузки до начала разгрузки.

Общее время загрузки:

$$T_{A3} = \sum_{j=3}^3 t_{Aj} + \sum_{j=1}^2 t_{Bj} + \sum_{j=1}^3 t_{Cj} + \sum_{j=1}^1 t_{Dj} + \sum_{j=1}^2 t_{Ej} + \\ + \sum_{j=1}^8 t_{Fj} + \sum_{j=1}^2 t_{Gj} + \sum_{j=1}^1 t_{Hj} + \sum_{j=1}^5 t_{Ij}.$$

Общее время всех переходов КС (q_{A3}) между стоянками до разгрузки:

$$q_{A3} = \sum_{k=3}^8 t_k,$$

где t_k – время одного перехода.

Тогда функциональное время производства 1 м³ древесины (T_{A3}^*):

$$T_{A3}^* = \frac{Q_{A3}}{V_{A3}}.$$

Предложенная методика определения функционального времени производства 1 м³ древесины для одной операции позволяет вычислить функциональное время производства 1 м³ древесины для множества операций. Суммированием этих функциональных времен определяется функциональное время производства 1 м³ древесины всего множества (T^*):

$$T^* = \frac{\sum_{j=1}^8 \sum_{i=A}^I T_{ij}}{27}.$$

Общую производительность технологического процесса последовательного выполнения всех операций от первой до разгрузки следует определять как

$$\Pi = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Заключение

Системный подход позволил установить единое функциональное время связности всех технологических операций (от начальной операции «загрузка» до конечной операции «начало разгрузки»), выполняемых колесным сортирентоподборщиком. Эффективная производительность определяется на основе расчета функционального времени производства единицы продукции (1 м³ древесины) в едином технологическом процессе, в котором все множество операций образуют взаимосвязанную и глубоко интегрированную пространственно-временную производственную систему. Если для выполняемых технологических операций объем древесины в грейферном захвате гидроманипулятора и время перехода между стоянками принять постоянными, то формула (3) соответствует формуле (1). В общем случае данные параметры являются статистическими переменными, поэтому расчеты существенно усложняются, и

для ускорения процесса обработки входящей информации, по мнению авторов, требуются усовершенствованные специализированные программные решения, например системы контроля и управления колесным сортиментоподборщиком Ponsse Opti 4G™ [23] и Ponsse Opti Control™ (в том числе Ponsse OptiPC™ и ПО Ponsse Forwarder™, функция отслеживания производительности Opti Progress Control™, приложение с системой геопозиционирования Opti Map 2™), применение которых позволяет планировать и использовать оптимальную трассировку волоков и отслеживать параметры лесной машины практически в режиме реального времени. Однако при использовании устройств разных фирм-изготовителей для разработки совместных лесосек (например, валочно-сучкорезной-раскряжевой машины John Deere и колесного сортиментоподборщика Rottne) потребуются разработка межплатформенного унифицированного по стандарту StanForD2010 программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Залесов С.В., Мехренцев А.В. Сортиментная заготовка древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 140 с. [Azarenok V.A., Gerts E.F., Zalesov S.V., Mekhrentsev A.V. *Cut-to-Length Timber Harvesting*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2015. 140 p.]
2. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: Теория и применение в лесном комплексе. Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с. [Andreyev V.N., Gerasimov Yu.Yu. *Optimal Decision Making: Theory and Application in the Forestry Complex*. Joensuu, Joensuu University Press, 1999. 200 p.]
3. Базаров С.М., Бельский Ю.И., Соловьев А.Н. Основы системного анализа производственных процессов. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 60 с. [Bazarov S.M., Belenskij Yu.I., Soloviov A.N. *Fundamentals of System Analysis of Production Processes*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2018. 60 p.]
4. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. Тбилиси: Метсниереба, 1974. 234 с. [Burkov V.N., Gorgidze I.A., Lovetskiy S.E. *Applied Problems of Graph Theory*. Tbilisi, Metsniyereba Publ., 1974. 234 p.]
5. Валяженков В.Д., Григорьев И.В. Современные машины и технологические процессы лесосечных работ. СПб.: СПбГЛТА, 2009. 288 с. [Valyazhenkov V.D., Grigoriev I.V. *Modern Machines and Technological Processes of Logging Operations*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2009. 288 p.]
6. Гладков Е.Г., Фаст В.И. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. СПб.: ЛТА, 1994. 45 с. [Gladkov E.G., Fast V.I. *Modeling and Optimization of Logging Processes*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1994. 45 p.]
7. Дербин В.М., Дербин М.В. Совершенствование сортиментной заготовки древесины // Лесотехн. журн. 2015. Т. 5, № 1(17). С. 128–135. [Derbin V.M., Derbin M.V. Improving Cut-to-Length Timber. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2015, vol. 5, no. 1(17), pp. 128–135]. DOI: [10.12737/11270](https://doi.org/10.12737/11270)
8. Евдокимов Б.П., Кормищикова З.И. Зарубежные лесные машины. Сыктывкар: СЛИ, 2007. 140 с. [Evdokimov B.P., Kormshchikova Z.I. *Foreign Forest Machines*. Syktyvkar, SLI Publ., 2007. 140 p.]
9. Кочегаров В.Г., Бит Ю.А. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 392 с. [Kochegarov V.G., Bit Yu.A. *Technology and Machines of Logging Operations*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1990. 392 p.]
10. Свойкин Ф.В., Григорьев И.В. Прогнозирование продолжительности периода разработки зимних лесосек в условиях Республики Коми // Тр. лесоинж. ф-та ПетрГУ, 2010. № 8. С. 34–37. [Svoikin F.V., Grigoriev I.V. Forecasting the Duration of the

Development Period for Winter Felling Sites in the Komi Republic. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2010, no. 8, pp. 34–37].

11. Свойкин В.Ф., Молчанова А.А. Исследование производительности лесных машин // Февральские чтения: сб. материалов науч.-практ. конф. проф.-преподават. состава Сыктывкар. лесн. ин-та по итогам науч.-исслед. работы в 2013 г. Сыктывкар, СЛИ, 2014 г. с. 370–373. [Svoikin V.F., Molchanova A.A. Research of Productivity of Forest Machines. *February Readings. Collection of Materials of the Scientific-Practical Conference of the Teaching Staff of the Syktyvkar Forestry Institute Based on the Results of Research Work in 2013*. Syktyvkar, SLI Publ., 2014, pp. 370–373].

12. Свойкин В.Ф., Молчанова А.А. Исследование производительности трелевочной машины в средней тайге Республики Коми // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 5-4(10-4). С. 275–279. [Svoikin V.F., Molchanova A.A. Performance Analysis Skidders in the Middle Taiga Komi Republic. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2014, vol. 2, no. 5-4(10-4), pp. 275–279]. DOI: [10.12737/7115](https://doi.org/10.12737/7115)

13. Brokmeier H., Strunk M. Struktur und Geschäftsfelder niedersächsischer Forstunternehmen. *Forst und Technik*, 2008, pp. 24–27.

14. Drewes D. Bestandesvorbereitung in der hochmechanisierten Holzernte. *Forsttechnik*, 2010. 12 p.

15. Drushka K., Orushka K., Kontinen H. *Tracks in the Forest: The Evolution of Logging Machinery*. Helsinki, Timberjack Group, 1997. 254 p.

16. Fleischer M. *Geschichte der Holzernte in Handarbeit*. Germany, Projekte-Verlag Cornelius, 2009. 212 p.

17. Kokkarinen J. *Koneellinen puunkorjuu – Hallitusti hyvään tulokseen*. Helsinki, Metsäteho Oy, 2013. 91 p.

18. Marchi E., Chung W., Visser R., Abbas D., Nordfjell T., Mederski P.S., McEwan A., Brink M., Laschi A. Sustainable Forest Operations (SFO): A New Paradigm in a Changing World and Climate. *Science of the Total Environment Journal*, 2018, vol. 634, pp. 1385–1397. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.04.084](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084)

19. *Spare Parts Catalog Ponsse A090200*. Finland, PonsseOyj, 2016. 431 p.

20. Stampfer K., Strinmuller T. *Harvester und Seilgerät im Steilgelände – Valmet 911.1 X3 M und Synchronfalke*. Wien, Universität für Bodenkultur, 2004. 25 S.

21. Thieme F. Naturgemäße Waldwirtschaft und modern Foresttechnik. *FT*, 1999, S. 12–13.

22. *User Manual. Operator Book Ponsse Buffalo (8WD)*. Finland, Ponsse Oyj, 2012. 181 p.

23. *User Manual. Operator Book Ponsse Opti 4G.4.705*. Finland, Ponsse Oyj, 2009. 382 p.

SYSTEM ANALYSIS OF PROCESS EFFICIENCY OF THE WHEELED FORWARDER

Sergey M. Bazarov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAW-5363-2020](https://orcid.org/0000-0003-1605-5834),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1605-5834>

Iurii I. Belenkii¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAX-2680-2020](https://orcid.org/0000-0002-4170-3664),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>

Sergey A. Ugryumov¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [F-6510-2016](https://orcid.org/0000-0002-8077-3542),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>

Fedor V. Svoikin¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [AAC-4074-2020](https://orcid.org/0000-0002-8507-9584),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8507-9584>

Vladimir F. Svoikin², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAQ-8212-2020](https://orcid.org/0000-0001-8989-4626), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8989-4626>

¹St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, leter U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: s.bazarow@yandex.ru, 2000zalom@gmail.com, ugr-s@yandex.ru, svoikin_fv@mail.ru

²Syktvykar Forest Institute – Branch of St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, ul. Lenina, 39, Syktvykar, 167982, Russian Federation; e-mail: svoikinvf@mail.ru

Abstract. One of the promising directions of increasing productivity in forestry production is a systematic approach to specifying the process efficiency of the wheeled forwarder based on constructing a single technological connectivity of all performed operations from the initial “loading” to the final “start of unloading”. System analysis allows to form coherent and flexible technological processes as single space-time production structures. The process efficiency of such structures depends on the extent to which the basis of the system analysis is used in assessing the fleet of forestry equipment or its elements. The basis of the unified connectivity of the discrete operations (the movement of the forest machine along the skidding track from pack to pack, setting the crane to the operating position, moving the grip towards the log, grabbing the log on the ground, sorting the log, aligning the pack, moving the pack into the cargo compartment, placing the log into the cargo compartment, installation of the crane into the transport position, and movement along the skidding track) from the position of the system theory is a representation of the functional time of manufacturing a production unit (1 m³ of wood) by operation and its superposition for all production operations. The superposition builds a single functional time for the integrity of the operations performed, in which the target function of the production structure is efficiently implemented. An analytical study of determining the effective performance in the functional time of the production process of the wheeled forwarder is given from the position of the system analysis. The article examines the timing of the work of the Ponsse Buffalo wheeled forwarder in the most typical natural and industrial conditions of the rental base of the Mondi Syktvykar JSC (middle taiga of the Komi Republic). The method of calculating the total capacity of the wheeled forwarder as a result of performance of all operations (loading, storage, and transportation to the place of unloading) is proposed. The possibility of applying the proposed method of assessing the wheeled forwarder efficiency is shown in terms of implementation of forecasting the total productivity of the forest machine in the functional time of manufacturing a production unit. The method allows you to choose the directions of increasing the labor productivity by synchronizing the functional time of all production operations.

For citation: Bazarov S.M., Belenkii Iu.I., Ugryumov S.A., Svoikin F.V., Svoikin V.F. System Analysis of Process Efficiency of the Wheeled Forwarder. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 116–129. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-116-129

Keywords: wheeled forwarder, system analysis, process efficiency, technological operations, functional time, productivity.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 26.02.20 / Received on February 26, 2020