

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ СОРТИМЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ

И.Р. Шегельман<sup>1</sup>, П.В. Будник<sup>1</sup>, Г.П. Паничев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр-т. Ленина, д. 33

<sup>2</sup> Департамент Союза лесопромышленников и лесозэкспортеров России, 101990, Москва, Армянский пер., д. 9/1

shegelman@onego.ru

Современный технологический процесс заготовки древесины является сложной системой как в техническом, так и в организационном отношении. Сегодня исследования таких систем, повышение их эффективности немислимы без предварительного использования методов математического моделирования. В работе представлена методика анализа технологического процесса заготовки сортиментов, основанная на применении теории очередей. Приведена адаптированная модель массового обслуживания, характеризующая процесс заготовки сортиментов с использованием комплекса машин, включающего харвестеры и форвардеры. Процесс рассмотрен как G/G/c-система массового обслуживания с групповым поступлением, где в качестве заявки выступает пачка сортиментов, состоящая из N числа сортиментов. Даны результаты экспериментальной проверки модели, подтверждающие ее адекватность. Эксперимент проводился на лесосеке, расположенной в Пряжинском районе Республики Карелия. Проведен анализ эффективности рассматриваемого комплекса и даны рекомендации по его оптимизации. Так, в условиях исследуемой лесосеки на практике существенно повысить эффективность работы комплекса путем регулировки работы (сокращение времени выполнения операций, и равномерность операций) отдельных машин не представляется возможным. В то же время изменение числа машин позволяет достичь значительных изменений в эффективности работы. Наиболее оптимальным комплексом машин для условий лесосеки, где были проведены эксперименты, является комплекс в составе двух харвестеров и двух форвардеров.

**Ключевые слова:** теория очередей, лесозаготовки, комплекс лесозаготовительных машин, моделирование

**Ссылка для цитирования:** Шегельман И.Р., Будник П.В., Паничев Г.П. Оптимизация комплекса лесозаготовительных машин для сортиментной технологии с применением теории очередей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-5-11

Современный технологический процесс заготовки древесины является сложной системой как в техническом, так и в организационном отношении. Например, в европейской части России и, в частности, в Республике Карелия широко распространена сортиментная технология с использованием харвестера и форвардера. Сегодня исследования таких систем, повышение их эффективности немислимы без предварительного использования методов математического моделирования.

Методы математического моделирования широко применяются для анализа и совершенствования лесозаготовительных работ исследователями Петрозаводского государственного университета. Здесь можно отметить работы А.В. Воронина с соавт. [1], И.Р. Шегельмана [2], В.Н. Андреева, Ю.Ю. Герасимова [3] и др.

На практике большое число разнообразных систем лесозаготовительных машин и используемых методов математического моделирования приводит к проблеме выбора подходящего метода для анализа протекающих технологических процессов. В связи с этим необходимо выработать универсальный подход. В качестве одного из таких подходов авторы предлагают использовать теорию очередей.

Методы теории очередей получили довольно широкое распространение в машиностроении,

легкой промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства [4–6], при этом решаются такие задачи, как: определение оптимального обеспечения запасными частями и агрегатами; исследование и оптимизация операций; анализ конвейерных и поточных производств; обоснование размеров запасов сырья или продукции, а также управление этими запасами; календарное планирование производства; анализ систем погрузки подвижных составов; исследование потоков транспортных средств и пешеходов; исследование процессов деревообработки; анализ и оптимизация лесозаготовительных технологических процессов.

В Петрозаводском государственном университете ведутся работы по приложению методов теории очередей к анализу и совершенствованию лесозаготовительных технологических процессов [7–9], при этом в максимальной степени используются хорошо разработанные вероятностные модели, адаптированные под исследуемые процессы.

### Цель и методика исследований

Цель данной работы — определение оптимального комплекта лесозаготовительных машин, обеспечивающих максимальную производительность лесозаготовительной техники с учетом вероятностного характера выполняемых ими операций.

Для достижения поставленной цели была составлена модель массового обслуживания. В ее основу положена работа Guy L. Curry и Richard M. Feldman [10]. Приведем краткое описание модели, позволяющей проанализировать процесс заготовки сортиментов с использованием харвестеров и форвардеров. Подробное описание вероятностных моделей, лежащих в основе приводимых формул, можно найти в указанной выше работе [10].

Технологический процесс заготовки сортиментов с использованием харвестеров и форвардеров рассматривается нами как  $G/G/c$ -система массового обслуживания с групповым поступлением, где в качестве заявки, выступает пачка сортиментов, состоящая из  $N$  числа сортиментов.

Интенсивность входного потока  $\lambda_i(B)$  определяет работу харвестера. Величина  $\lambda_i(B)$  характеризует среднее число пачек сортиментов, вырабатываемых в единицу времени  $i$ -м харвестером. Заявка считается поступившей, как только получено  $N$  число сортиментов. Величина  $N$  является целочисленной и случайной величиной с произвольным распределением. При поступлении в систему заявка либо поступает на обслуживание, либо, если обслуживающее устройство (форвардер) занято, считается находящейся в накопителе (волоке).

Интенсивность обслуживания  $\mu_j(B)$  характеризует работу форвардера и определяется как среднее число заявок, обслуживаемых в единицу времени  $j$ -м форвардером.

В случае работы  $m$  числа харвестеров интенсивность входного потока характеризует среднее число сортиментов, выпиливаемых всеми харвестерами в единицу времени, т. е. рассматривается как сумма  $m$  независимых потоков с общей интенсивностью

$$\lambda(I) = \sum_{i=1}^m \lambda_i(I), \quad (1)$$

где  $m$  — число харвестеров;  $\lambda_i(I)$  — среднее число сортиментов, выпиливаемых  $i$ -м харвестером в единицу времени.

Величины  $\lambda(I)$  и  $\lambda(B)$  связаны выражением  $\lambda(B) = \lambda(I)/E[N]$ , где  $E[N]$  — среднее число сортиментов в пачке.

Моделирование направлено на определение таких величин, как средняя длина цикла  $E[CT_s]$ , среднее число заявок в системе  $E[WIP]$ , коэффициент загрузки  $u(B)$ , среднее время пребывания заявки в очереди  $E[T_q(B)]$ , среднее число заявок в очереди  $E[WIP_q]$ .

Для системы массового обслуживания с групповым поступлением величина  $E[CT_s]$  определяется следующим образом:

$$E[CT_s] = E[D] + E[T_q(B)] + E[T_s(B)], \quad (2)$$

где  $E[D]$  — среднее время выпиливания всеми харвестерами пачки сортиментов (время формирования заявки);

$E[T_q(B)]$  — среднее время пребывания заявки в очереди;

$E[T_s(B)]$  — среднее время обслуживания заявки.

Величина  $E[D]$  определяется с помощью тождества Вальда

$$E[D] = E[T_a(I)], \quad (3)$$

где  $E[T_a(I)] = 1/\lambda(I)$  — среднее время между моментами выпиливания сортиментов с учетом работы всех харвестеров.

Среднее время, проведенное пачкой сортиментов в очереди при работе нескольких форвардеров, находят по формуле

$$E[CT_q] = \left( \frac{C_a^2(B) + C_s^2(B)}{2} \right) \times \left( \frac{u(B)^{\sqrt{2c+2}-1}}{c(1-u(B))} \right) E[T_s(B)], \quad (4)$$

где  $C_a^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов всеми харвестерами;

$C_s^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени обслуживания пачки форвардером;

$u(B)$  — коэффициент загрузки;

$c$  — число обслуживающих устройств (количество форвардеров).

Коэффициент загрузки при работе нескольких форвардеров определяется зависимостью

$$u(B) = \lambda(I) / (\mu(B)E[N]c). \quad (5)$$

Квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов всеми харвестерами

$$C_a^2(B) = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i(B)}{\lambda(B)} C_{a,i}^2(B), \quad (6)$$

где  $\lambda_i(B)$  — среднее число пачек сортиментов, выпиливаемых  $i$ -м харвестером за единицу времени;

$C_{a,i}^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов  $i$ -м харвестером.

Величины  $\lambda_i(I)$  и  $\lambda_i(B)$  связаны выражением

$$\lambda_i(B) = \lambda_i(I) / E[N].$$

Величина  $\lambda_i(I)$  рассчитывается согласно формуле

$$\lambda_i(I) = 1 / E[T_{a,i}(I)], \quad (7)$$

где  $E[T_{a,i}(I)]$  — среднее время выпиливания сортимента  $i$ -м харвестером.

Величина  $C_{a,i}^2(B)$  определяется по формуле

$$C_{a,i}^2(B) = \frac{C^2[T_{a,i}(I)]}{E[N]} + C^2[N], \quad (8)$$

где  $C^2[T_{a,i}(I)]$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания  $i$ -м харвестером одного сортимента;

$C^2[N]$  — квадрат коэффициента вариации числа сортиментов, помещающихся на платформе форвардера.

Величина  $C^2[T_{a,i}(I)]$  определяется выражением

$$C^2[T_{a,i}(I)] = V[T_{a,i}(I)] / E[T_{a,i}(I)]^2, \quad (9)$$

где  $V[T_{a,i}(I)]$  — дисперсия времени выпиливания сортимента  $i$ -м харвестером.

Значение  $C_s^2(B)$  определяется как средневзвешенная величина

$$C_s^2(B) = \sum_{j=1}^c \frac{\mu_j(B)}{\mu(B)} C_{s,j}^2(B), \quad (10)$$

где  $\mu_j(B)$  — среднее число пачек сортиментов, обслуживаемых  $j$ -м форвардером за единицу времени;

$\mu(B)$  — суммарная интенсивность потока обслуживания;

$C_{s,j}^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени обслуживания пачки  $j$ -м форвардером.

При работе  $c$  числа форвардеров суммарная интенсивность обслуживания

$$\mu(B) = \sum_{j=1}^c \mu_j(B). \quad (11)$$

Значение величины  $C_{s,j}^2(B)$  определяется следующим выражением:

$$C_{s,j}^2(B) = V[T_{s,j}(B)] / E[T_{s,j}(B)]^2, \quad (12)$$

где  $V[T_{s,j}(B)]$  — дисперсия времени обслуживания пачки сортиментов  $j$ -м форвардером;

$E[T_{s,j}(B)]$  — среднее время обслуживания пачки сортиментов  $j$ -м форвардером.

При работе  $c$  числа форвардеров величину  $E[T_s(B)]$  можно определить как среднее арифметическое

$$E[T_s(B)] = \sum_{i=j}^c E[T_{s,j}(B)] / c. \quad (13)$$

Величины, необходимые для расчета по описанной модели, определяются по результатам статистической обработки данных, полученных путем хронометражных наблюдений за работой лесозаготовительных машин.

Для проверки модели были проведены экспериментальные исследования. Эксперимент прово-

дился на лесосеке, расположенной в Пряжинском районе Республики Карелия. Основанием для выбора лесосеки являлась ее типичность для южного региона Республики Карелия.

Анализ экспериментальных данных показал, что средняя длина цикла, полученная по эмпирическим данным, составляет 93 % от средней длины цикла, рассчитанной по описанной модели. Таким образом, модель подтверждается экспериментальными данными.

Важными расчетными характеристиками модели являются: средняя длина цикла  $E[CT_s]$ , коэффициент загрузки  $u(B)$ , среднее время пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$ , среднее число заявок в системе  $E[WIP]$ , среднее число заявок в очереди  $E[WIP_q]$ . Поясним практический смысл этих величин.

Величина  $E[T_q(B)]$  характеризует время, которое в среднем поступившая в систему заявка ждет обслуживания. При снижении данной величины повышается равномерность работы системы и, в общем случае, производительность.

Средняя длина цикла ( $E[CT_s]$ ) состоит из трех компонентов: времени формирования заявки, времени, проведенного заявкой в очереди, и времени обслуживания заявки. Чем меньше это величина, тем быстрее готовый сортимент оказывается в штабеле на погрузочной площадке (верхнем складе). При снижении величины  $E[CT_s]$  и неизменности средних характеристик пачки сортиментов ( $E[N]$  и  $C^2[N]$ ) можно говорить о повышении производительности работы комплекса лесозаготовительных машин.

Важной величиной является коэффициент загрузки  $u(B)$ , показывающий степень загруженности обслуживающего устройства (форвардера). По значению величины  $u(B)$  можно судить о загрузке обслуживающего устройства и времени его простоя. Так, при  $u(B) > 1$  форвардер перегружен, при  $u(B) < 1$  форвардер недогружен, при этом лесозаготовительная машина будет простаивать долю времени, равную  $1 - u(B)$ . Важно отметить, что величина очереди нелинейно возрастает при приближении  $u(B)$  к единице. Это является одной из основных причин, приводящих к перегрузке системы.

Величина  $E[WIP]$  характеризует объем сортиментов, находящихся на лесосеке. Одна единица величины  $E[WIP]$  составляет  $10 \text{ м}^3$  сортиментов. Данный объем равен объему сортиментов, помещающихся на платформе форвардера John Deere 1110D Eco III.

## Результаты и обсуждение

Для получения рекомендаций по оптимизации комплекса лесозаготовительных машин проследим, как влияет на значение расчетных величин

изменение некоторых параметров работы комплекса.

Разброс (дисперсия) времени поступления сортиментов и времени обслуживания пачки сортиментов определяются в модели величинами  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$ . Их уменьшение указывает на повышение равномерности работы машин. Нетрудно заметить, что зависимость между величинами  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$  и расчетными величинами  $E[CT_s]$ ,  $E[T_q(B)]$ ,  $E[WIP]$  имеет линейный характер. При увеличении первых вторые также возрастают. При уменьшении величины  $C^2_s(B)$  на 10 % величины  $E[CT_s]$  и  $E[WIP]$  уменьшаются на 0,31 %, а  $E[T_q(B)]$  — на 4,78 %, при этом коэффициент загрузки остается неизменным. В целом анализ показал, что изменение равномерности работы машин в довольно широком интервале (изменения величин  $C^2[T_a(I)]$  и  $C^2_s(B)$  до 100 % при неизменной величине  $E[T_a(I)]$ ) не оказывает существенного влияния на эффективность работы системы (комплекса машин).

Более существенно на расчетные величины влияет изменение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов  $E[T_a(I)]$ . На рис. 1 приведены графики зависимостей расчетных величин от изменения  $E[T_a(I)]$ .

Анализ показал, что уменьшение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов  $E[T_a(I)]$  в пределах 20 % позволяет несколько сократить среднюю длину цикла  $E[CT_s]$  и среднее время пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$  при незначительном снижении коэффициента загрузки  $u(B)$ . Уменьшение величины  $E[T_a(I)]$  более чем на 20 % приводит к перегрузке форвардера, так как  $u(B) > 1$ . При

этом время увеличение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов приводит к возрастанию средней длины цикла и уменьшению коэффициент загрузки.

Изменение величины  $E[T_a(I)]$  может оказать существенное воздействие на эффективность работы рассматриваемого комплекса. Однако на практике данная величина зависит от природно-производственных условий, что тяжело поддается управлению.

В значительной степени на расчетные величины влияет математическое ожидание (среднее выборочное) времени обслуживания пачки сортиментов  $E[T_s(B)]$ . На рис. 2 приведены графики их зависимостей от изменения величины  $E[T_s(B)]$ .

Как видно из рис. 2, уменьшение  $E[T_s(B)]$  приводит к снижению расчетных величин. Так, при снижении  $E[T_s(B)]$  на 10 % величины  $E[CT_s]$  и  $E[WIP]$  уменьшаются на 6 %, а  $E[T_q(B)]$  на 36 %,  $u(B)$  на 10 %. Следует также отметить, что увеличение математического ожидания времени обслуживания пачки сортиментов более чем на 30 % приведет к перегрузке форвардера  $u(B) > 1$ .

Одновременное увеличение  $E[T_s(B)]$  на 10 % с уменьшением величины  $E[T_a(I)]$  на 10 % приводит к ощутимому увеличению расчетных величин, а именно,  $E[CT_s]$  на 13 %,  $E[T_q(B)]$  на 227 %,  $E[WIP]$  на 26 %,  $u(B)$  на 22 %. При осуществлении обратного действия расчетные величины уменьшаются на 2, 50, 11 и 18 % соответственно.

Таким образом, в данной ситуации существенно повысить эффективность работы комплекса машин путем регулирования их работы (изменяя величины  $E[T_a(I)]$ ,  $E[T_s(B)]$ ,  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$ ) не представляется возможным.

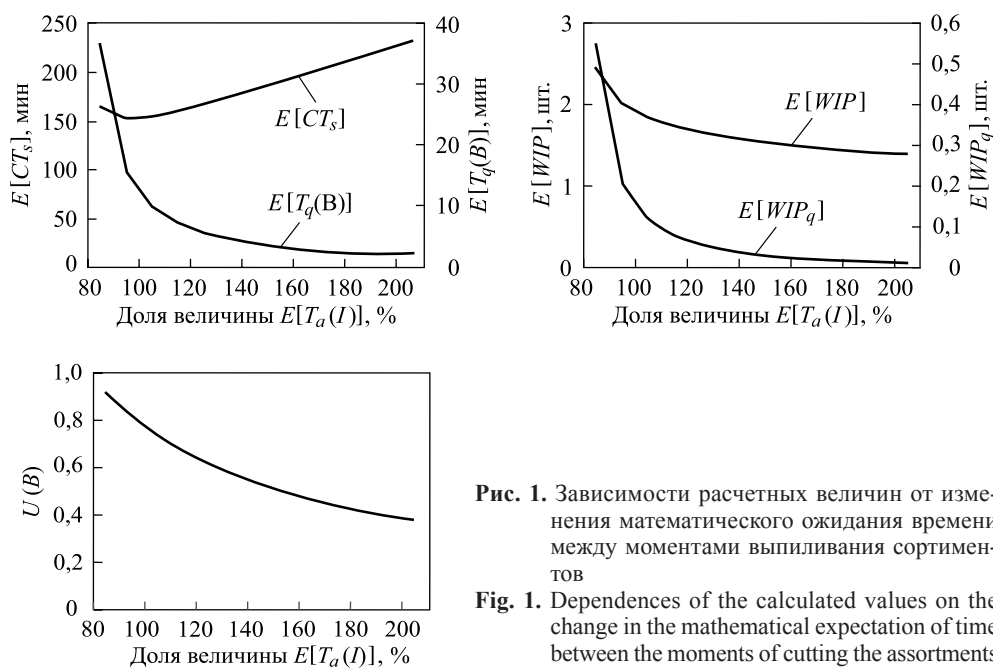


Рис. 1. Зависимости расчетных величин от изменения математического ожидания времени между моментами выпиливания сортиментов

Fig. 1. Dependences of the calculated values on the change in the mathematical expectation of time between the moments of cutting the assortments

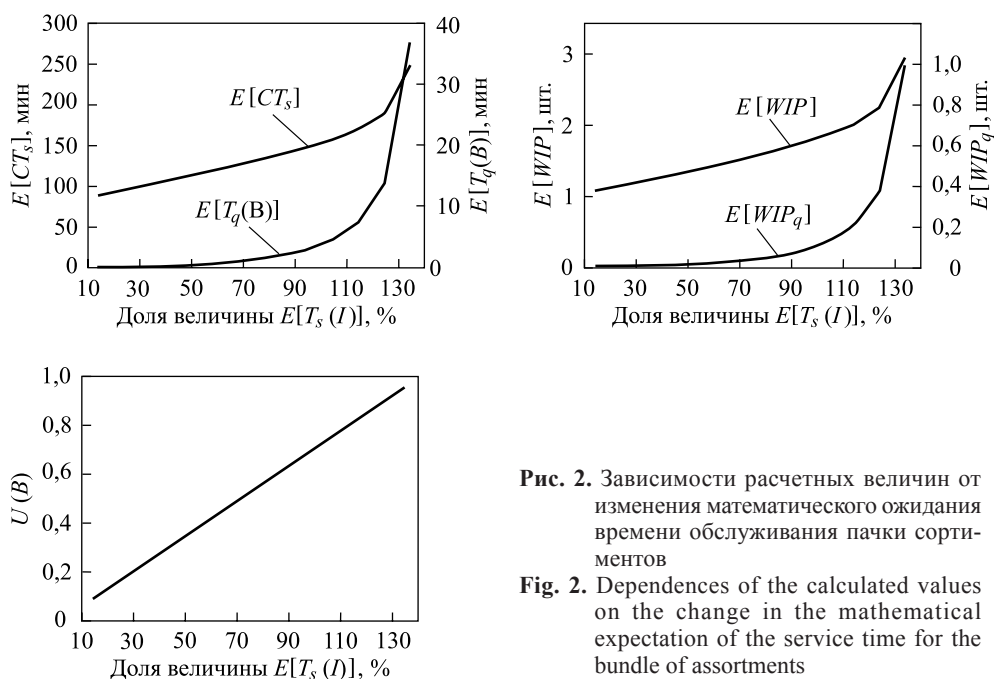


Рис. 2. Зависимости расчетных величин от изменения математического ожидания времени обслуживания пачки сортиментов

Fig. 2. Dependences of the calculated values on the change in the mathematical expectation of the service time for the bundle of assortments

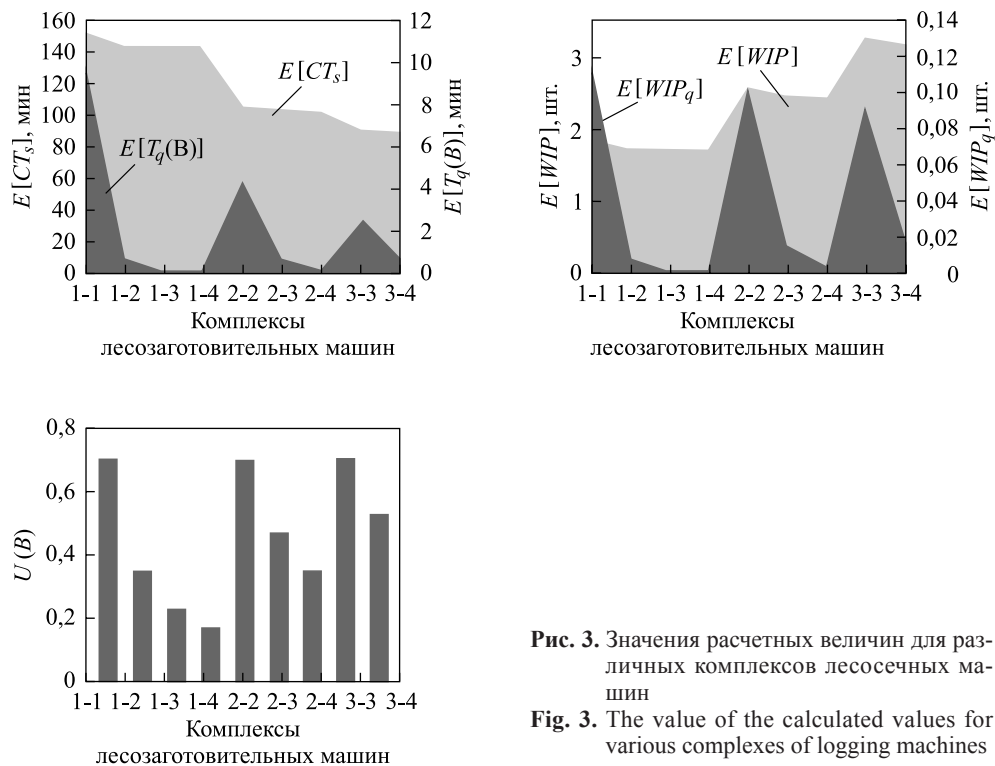


Рис. 3. Значения расчетных величин для различных комплексов лесосечных машин

Fig. 3. The value of the calculated values for various complexes of logging machines

Проследим, как будут изменяться расчетные величины в зависимости от изменения числа работающих лесосечных машин (рис. 3). Для пояснения отметим, что запись на осях абсцисс «1–2» означает, что комплекс включает один харвестер и два форвардера, запись «2–2» — два харвестера и два форвардера и т. д.

### Выводы

Увеличение числа форвардеров, работающих в комплексе с одним харвестером, приводит к снижению средней длины цикла  $E[CT_s]$  и среднего времени пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$ . Однако в этом случае значи-

тельно снижается и коэффициент загрузки  $u(B)$ . На практике это приведет к простоям форвардеров. Для принятия решения в таком случае необходимо проводить дополнительные экономические расчеты.

Кратное увеличение интенсивности входного потока, что соответствует параллельной работе нескольких харвестеров, также приводит к снижению расчетных величин. Однако в этом случае наблюдаются более высокие значения коэффициента загрузки. Из графиков, приведенных на рис. 3, видно, что использование комплексов 2–2 и 3–3 приводит к снижению расчетных величин  $E[CT_s]$ ,  $E[T_q(B)]$  в сравнении с комплексом 1–1, причем коэффициент загрузки остается неизменным. На основании этого можно говорить об их более эффективной работе. Такое повышение эффективности объясняется тем, что при работе в одном комплексе происходит компенсация неравномерности работы отдельных лесозаготовительных машин.

Если учитывать небольшие размеры лесосеки (эксплуатационная площадь 19,5 га; среднее расстояние транспортировки форвардером 200 м), на которой проводились эксперименты, то наиболее оптимальным комплексом, по мнению авторов, мог бы быть комплекс в составе двух форвардеров и двух харвестеров. Это обусловлено тем, что применение большого числа лесосечных машин на данной лесосеке затруднительно ввиду сложности организации одновременной их работы и соблюдения техники безопасности.

При увеличении числа машин в комплексе увеличивается объем сортиментов, одновременно находящихся на лесосеке (вдоль волоков), что также необходимо принимать в расчет. Например, при работе одного харвестера и одного форвардера величина  $E[WIP]$  составляет 1,84 шт., что равноценно 18,4 м<sup>3</sup> сортиментов. При увеличении числа машин в комплексе до трех харвестеров и че-

тырех форвардеров значение  $E[WIP]$  повышается практически в два раза и уже составляет 3,19 шт., т. е. 31,9 м<sup>3</sup> сортиментов находится вдоль волоков на лесосеке.

Отметим также, что комплексы 2–1, 3–2 и 3–3 не рекомендуется использовать, так как в этом случае коэффициент загрузки превышает единицу.

Таким образом, на основании разработанной модели оптимальным комплексом машин для сортиментной заготовки леса в рассмотренных условиях является комплекс, включающий два харвестера и два форвардера.

## Список литературы

- [1] Воронин А.В., Кузнецов В.А., Шегельман И.Р., Щеголева Л.В. Теория и практика принятия оптимальных решений для предприятий лесопромышленного комплекса. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. 220 с.
- [2] Шегельман И.Р. Вывозка леса автопоездами. Спб.: ПРОФИКС, 2008. 3004 с.
- [3] Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Повышение качества и надежности манипуляторного технологического оборудования лесных машин при проектировании. Ч. 1. Петрозаводск: ПетрГУ, 1995. 119 с.
- [4] Кокс Д., Смит У. Теория очередей. М.: Мир, 1966. 336 с.
- [5] Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Советское радио, 1970. 520 с.
- [6] Прахбу Н. Методы теории массового обслуживания и управления запасами. М.: Машиностроение, 1969. 356 с.
- [7] Морозов Е.В., Шегельман И.Р., Будник П.В. Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов // Перспективы науки, 2011. № 7 (22). С. 183–186.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia // Lesn. Cas. For. J., 2015, no. 61, pp. 211–220.
- [9] Будник П.В. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность заготовки сортиментов и лесосечных отходов, на основе функционально-технологического анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. 2011. 22 с.
- [10] Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing systems modeling and Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.

## Сведения об авторах

**Шегельман Илья Романович** — д-р техн. наук, профессор, руководитель Инжинирингового центра Петрозаводского государственного университета, shegelman@onego.ru

**Будник Павел Владимирович** — канд. техн. наук, руководитель сектора патентования Инжинирингового центра Петрозаводского государственного университета, budnikpavel@yandex.ru

**Паничев Геннадий Павлович** — начальник департамента Союза лесопромышленников и лесозаготовителей России, g.panichev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.05.2017 г.

## OPTIMIZATION OF FOREST MACHINES COMPLEX FOR ASSORTMENT TECHNOLOGY USING QUEUING THEORY

I.R. Shegel'man<sup>1</sup>, P.V. Budnik<sup>1</sup>, G.P. Panichev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Petrozavodsk State University (PetrSU), 33, Lenin Str., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

<sup>2</sup> Union of Timber Manufacturers and Exporters of Russia, 101990, Moscow, Armenian trans., 9/1/1

shegelman@onego.ru

Modern technological process of logging is a complex system both technically and organizationally. Today the study of such systems to improve their efficiency is impossible without the use of mathematical modeling. The paper presents a method for analyzing the process workpiece assortments based on the use of the queueing theory. An adapted queueing model is showed in the article. The model characterizes the process of harvesting logs using complex machines as a part of a harvester and a forwarder. The process is considered as the G/G/c queueing system with batch arrival, where the application performs a pack assortments consisting of N number of assortments. The results of experimental verification of the model are given. The results confirm the model. The experiment was conducted in the cutting area, located in the Republic of Karelia Pryazha region. There was conducted the analysis of the effectiveness of this complex and recommendations for optimization. So in the studied cutting area it is not possible to significantly improve the efficiency of the complex by adjusting the operation (short-time operations and uniformity) of particular machines. At the same time change in the number of machines can achieve a significant change in performance. The optimal conditions for the complex machines cutting area where the experiments were conducted, is a complex of two harvesters and two forwarders.

**Keywords:** queueing theory, logging, complex harvesting machines, modeling

**Suggested citation:** Shegel'man I.R., Budnik P.V., Panichev G.P. *Optimizatsiya kompleksa lesozagotovitel'nykh mashin dlya sortimentnoy tekhnologii s primeneniem teorii ocheredey* [Optimization of complex forest machines for assortment technology using queueing theory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-5-11

### References

- [1] Voronin A.V., Kuznetsov V.A., Shegel'man I.R., Shchegoleva L.V. *Teoriya i praktika prinyatiya optimal'nykh resheniy dlya predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa* [Theory and practice of optimal solutions for the timber industry enterprises]. Petrozavodsk: PetrGU Publ., 2008, 220 p.
- [2] Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznets A.V., Pladov A.V. *Vyvozka lesa avtopoezdami* [Extraction of forest trains]. St. Petersburg: PROFIKS Publ., 2008. 304 p.
- [3] Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu. *Povyshenie kachestva i nadezhnosti manipulyatornogo tekhnologicheskogo oborudovaniya lesnykh mashin pri proektirovani* [Improving the quality and reliability of the manipulator of the process equipment in the design of forest machines]. Petrozavodsk: PetrGU Publ., 1995, 119 p.
- [4] Koks D., Smit U. *Teoriya ocheredey* [Queueing theory]. Moscow: Mir Publ., 1966, 336 p.
- [5] Saati T.L. *Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya* [Elements of queueing theory and its applications]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1970, 520 p.
- [6] Prakhbu N. *Metody teorii massovogo obsluzhivaniya i upravleniya zapasami* [The methods of queueing theory and inventory control]. Moscow: Mashinostroenie, Publ. 1969, 356 p.
- [7] Morozov E.V., Shegel'man I.R., Budnik P.V. *Veroyatnostno-statisticheskiy analiz protsessa zagotovki sortimentov* [Probabilistic and statistical analysis of the procurement process assortments] *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2011, no. 7(22), pp. 183–186.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory. Case study from Karelia. *Lesn. Cas. For. J.*, 2015, v. 61, pp. 211–220.
- [9] Budnik P.V. *Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' zagotovki sortimentov i lesosechnykh otkhodov, na osnove funktsional'no-tekhnologicheskogo analiza* [Justification of technological solutions to improve the efficiency of assortments and harvesting forest residues, based on the functional and technological analysis. Diss. kand. tehn. nauk]. Petrozavodsk, 2011, 22 p.
- [10] Curry Guy L., Feldman Richard M. *Manufacturing systems modeling and Analysis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

### Author's information

**Shegel'man Il'ya Romanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Petrozavodsk State University (PetrSU), shegelman@onego.ru

**Budnik Pavel Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Petrozavodsk State University (PetrSU), budnikpavel@yandex.ru

**Panichev Gennadiy Pavlovich** — Head of Department of Union of Timber Manufacturers and Exporters of Russia, g.panichev@mail.ru

Received 11.05.2017