

Skrypnikov Alexey Vasilyevich – Professor, Department of information security of the "Voronezh state University of engineering technologies", doctor of technical Sciences, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru

Mikova Elena Y. – external information security department FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation, e-mail: Leencha@ya.ru

Mogutnov Roman Viktorovich – external information security department FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation, e-mail: r-mogutnov@mail.ru

Chirkov Evgeniy Viktorovich – external information security department FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation, e-mail: chirkov_e_v@mail.ru

DOI: 10.12737/article_5ab0dfc0247508.69266095

УДК 630*7

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА СЕТЯХ ПЕТРИ

доктор технических наук, доцент **А. П. Соколов**¹

Е. В. Осипов¹

1 – ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация

Статья посвящена описанию решения задачи обоснования технологии заготовки древесины, с использованием имитационного моделирования производственных процессов на сетях Петри. Рассматривается возможность использования специально разработанных имитационных моделей работы комплексов лесозаготовительных машин, состоящих из харвестера и форвардера, не только для принятия решений по выбору машин при формировании комплексов, но и для обоснования технологических решений. Решение задачи описывается на примере делянки неправильной формы с магистральным волоком значительной протяженности. Основу применяемого подхода составляет использование метода дискретно-событийного имитационного моделирования на сетях Петри. Приведены результаты выполненных полевых исследований, моделирования и совершенствования технологического процесса. Результаты моделирования показали, что в условиях рассмотренной лесосеки форвардер загружен неравномерно. Простой этой машины составил 24,5 ч. или 7% времени. Простой харвестера составил 9 ч. или 3%. В результате анализа полученного при моделировании распределения простоев машин во времени, было выявлено, что это связано с постоянно уменьшающейся производительностью форвардера, вследствие увеличивающегося расстояния трелевки. В результате выполненного исследования было рекомендовано внести изменения в технологию разработки лесосеки, заключающиеся в том, что харвестер будет начинать работу не с ближних по отношению к погрузочной площадке пасек, а с дальних, находящихся в конце магистрального волока. Моделирование, выполненное после внесения в модель изменений, показало, что в случае перехода к предлагаемой технологии разработки лесосек, может быть достигнут рост производительности комплекса машин харвестер+форвардер на 2,3% за счет сокращения суммарного простоя машин. Можно рекомендовать применение такой технологии в случае лесосек с магистральным волоком значительной протяженности. Таким образом, при решении реальной производственной задачи была доказана эффективность предлагаемого подхода к оценке вариантов технологических решений на заготовке древесины.

Ключевые слова: заготовка древесины, системы лесозаготовительных машин, харвестер, форвардер, имитационное моделирование, сети Петри

SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGY OF WOOD HARVESTING WITH THE HELP OF IMITATION MODELING ON PETRI NET

DSc (Engineering), Associate Professor **A.P. Sokolov**¹

E.V. Osipov¹

1 – FSBEI HE «Petrozavodsk State University», Petrozavodsk, Russian Federation

Abstract

The article is devoted to the description of the solution of the problem of substantiating the technology of wood harvesting, using simulation modeling of production processes on Petri nets. The possibility of using specially developed simulation models for the operation of forestry machine complexes consisting of a harvester and forwarder is considered, not only for making decisions on the choice of machines for the formation of complexes, but also for justifying technological solutions. The solution of the problem is described in the example of a plot of irregular shape with a long trail of considerable length. The basis of the used approach is the use of the method of discrete-event simulation on Petri nets. The results of field research, modeling and improvement of the technological process are given. The results of the simulation has showed that the forwarder is loaded unevenly under the conditions of the considered cutting area. The simple of this machine was 24.5 hours or 7% of the time. A down-time of harvester was 9 hours or 3%. As a result of analyzing the simulation of the machine downtime distribution over time, it was found that this was due to the constantly decreasing forwarder performance, due to the increasing distance of skidding. As a result of the carried out research, it has been recommended to make a change in the technology for the development of the cutting area, consisting in the fact that the harvester does not start with the apiaries which are close to the loading platform, but from distant ones at the end of the main line. Modeling performed after the introduction of changes into the model has showed that in case of a shift to the proposed technology for cutting logging, productivity of harvester + forwarder machine complex can be increased by 2.3% by reducing the total downtime of the machines. It is possible to recommend the use of such technology in case of logging sites with a long haul of considerable length. Thus, when solving the real production problem, the effectiveness of the proposed approach to the evaluation of options for technological solutions for logging.

Keywords: harvesting, logging machine systems, harvester, forwarder, simulation, Petri nets

Введение

Большое разнообразие природно-производственных условий, в которых осуществляется лесозаготовительное производство делает весьма актуальным вопрос правильного выбора применяемых машин и технологий [5, 9]. При должном обосновании этого выбора можно добиться значительного роста производительности и общей эффективности производства [1, 10, 11].

В статье [7] нами было предложено использовать специально разработанные имитационные модели для обоснования решений по выбору лесозаготовительных машин при формировании комплексов, работающих по сортиментной технологии и состоящих из двух машин: харвестера и форвардера. В указанной статье был рассмотрен простейший случай лесосеки прямоугольной формы с лесовозной дорогой, проходящей непосредственно по ее территории.

На практике же часто встречаются лесосеки неправильной формы, наличие же дороги вообще является редкостью. В настоящей статье описывается решение задачи имитационного моделирования заготовки древесины в случае делянки неправильной формы с магистральным волоком значительной протяженности.

Методы и средства

Для решения поставленной задачи использовались подход, методы и средства, подробно описанные в статье [7]. Основу подхода составляет применение метода дискретно-событийного имитационного моделирования [3, 4, 6, 8], которое выполняется на маркированных сетях Петри [2, 7].

Исходными данными для работы модели послужили результаты хронометрирования и последующей оценки производительности работы машин на конкретной исследуемой лесосеке.

Исходные данные

К особенностям рассматриваемой лесосеки можно отнести то, что лесосека отделена от погрузочной площадки старой вырубкой, по которой проходит один магистральный волок, соединяющийся с магистральным волоком лесосеки, что является главной причиной увеличения расстояния трелевки (рис. 1). Общая длина магистрального волока составляет одну тысячу метров. Средний объем хлыста составляет $0,39 \text{ м}^3$, общий запас ликвидной древесины – 8100 м^3 , расстояние трелевки – 200-1000 м.

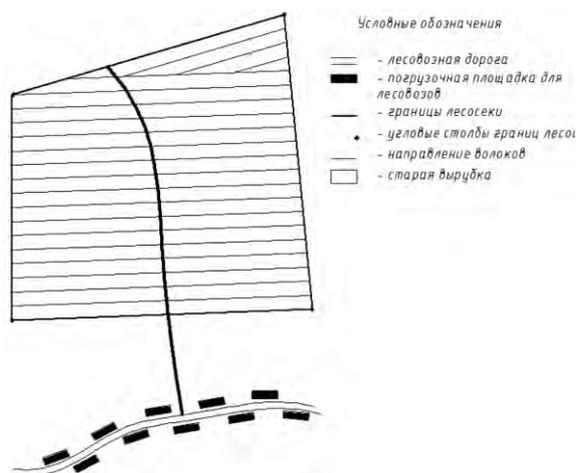


Рис. 1. Схема лесосеки

На лесосеке заготовку древесины осуществлял комплекс машин в составе харвестера Komatsu 931 и форвардера Komatsu 890.3. Результаты хронометражных исследований на данной лесосеке показали следующее. Средняя производительность харвестера составила 231 кубический метр в смену. Средняя производительность форвардера показала обратную пропорциональную зависимость от расстояния трелевки. Так при расстоянии трелевки 200...400 метров средняя производительность составляет 17,4 рейса в смену (301 кубический метр); при расстоянии трелевки 400...600 метров – 15 рейсов в смену (259,5 кубических метров); при расстоянии трелевки 600...800 метров – 13,4 рейса (231 кубический метр); при расстоянии трелевки 800...1000 метров – 12 рейсов (205,5 кубических метров). Средний объем древесины, перемещаемой за один рейс форвардера, составил $17,3 \text{ м}^3$. Средний объем древесины, заготавливаемой на одном

волоке, равняется 127 м^3 . Общее число волоков – 64. Форвардеру в среднем необходимо 8 рейсов, чтобы выполнить полностью трелевку на одном волоке.

Результаты хронометража в разрезе отдельных операций, выполняемых форвардером, приведены в таблице 1. Исходя из того, что магистральный волок проходит посередине лесосеки, принимается следующий порядок освоения лесосеки лесозаготовительным комплексом: харвестер разрабатывает один волок с левой стороны от магистрального волока, затем волок с правой стороны от магистрального волока, после производит переезд по магистральному волоку до начала следующего волока с левой стороны, затем с правой и т.д. Такая же схема применяется при осуществлении работы форвардера.

Из этой схемы следует, что после уборки каждых двух волоков форвардером, происходит увеличение расстояния трелевки древесины и, соответственно, времени, необходимого для этого. Данный факт был учтен при создании имитационной модели.

Результаты

Для имитационного моделирования рассматриваемого производственного процесса в среде пакета программ HPSim была построена маркированная сеть Петри (рис. 2).

При этом, модель для случая прямоугольной делянки без магистрального волока, подробно описанная в статье [7], была дополнена с целью учета увеличивающегося по мере освоения лесосеки расстояния трелевки. Приведем здесь описание только вновь добавленных элементов модели.

Так, позиция P19 является счетчиком количества убранных волоков. Позиция P19 связана с позициями P41 и P47 через переход T35, причем вес исходящей дуги – 16, а вес входящих в позиции P41 и P47 – 2. При работе модели каждый раз после уборки пары волоков (для этого необходимо в среднем 16 ходок форвардера) в позицию P41 будет переходить по два маркера, соответственно, количество маркеров в позиции P41 всегда будет четным. Позиция P47 дублирует позицию P41.

Результаты хронометража процесса трелевки

Время на:		Время движения пустым и груженым при расстоянии трелевки							
Загрузку мин. сек. мин.	Разгрузку мин. сек. мин.	200 – 400 м		400 – 600 м		600 – 800 м		800 – 1000 м	
		Пустой мин. сек. мин.	Груже- ный мин. сек. мин.	Пустой мин. сек. мин.	Груже- ный мин. сек. мин.	Пустой мин. сек. мин.	Груже- ный мин. сек. мин.	Пустой мин. сек. мин.	Груже- ный мин. сек. мин.
		20:40 20,67	6:19 6,31	1:10 1,17	5:13 5,22	3:29 3,48	8:21 8,35	8:50 8,83	11:42 11,7
20:43 20,72	6:43 6,72	1:43 1,72	6:03 6,05	3:50 3,83	8:13 8,21	6:44 6,73	11:12 11,2	11:23 11,38	13:02 13,03
20:16 20,27	7:00 7	2:56 2,93	5:32 5,53	4:40 4,67	7:40 7,67	7:23 7,38	10:47 10,78	10:18 10,3	13:18 13,3
19:47 19,78	7:27 7,45	2:03 2,05	4:58 4,97	5:27 5,45	9:15 9,25	7:40 7,67	10:00 10	10:42 10,7	13:43 13,71
19:21 19,35	7:23 7,38	1:48 1,8	6:26 6,43	5:03 5,05	8:45 8,75	6:49 6,82	9:38 9,63	9:50 9,83	12:20 12,3
19:03 19,05	7:14 7,23	1:24 1,4	4:58 4,97	4:16 4,27	9:27 9,45	8:54 8,9	9:42 9,7	10:36 10,6	12:51 12,85
18:49 18,82	7:39 7,65	1:59 1,98	6:18 6,3	4:48 4,8	7:56 7,93	8:36 8,6	9:52 9,87	9:46 9,76	14:07 14,12
18:52 18,87	6:54 6,9	2:43 2,72	5:38 5,63	5:22 5,37	7:48 7,8	7:09 7,15	11:18 11,8	10:11 10,18	13:00 13
19:22 19,37	7:18 7,3	3:02 3,03	5:41 5,68	5:26 5,43	8:35 8,58	6:56 6,93	9:26 9,43	9:14 9,23	13:49 13,82
19:11 19,18	7:22 7,37	2:55 2,92	5:10 5,17	5:11 5,18	8:52 8,87	6:38 6,63	10:43 10,72	9:29 9,48	13:13 13,22
Средние значения									
19:36 19,6	7:07 7,12	2:10 2,17	5:35 5,58	4:45 4,75	8:29 8,48	7:33 7,55	10:26 10,43	10:15 10,25	13:21 13,35

Позиция Р41 соединена дугами с позициями Р67-Р97 через переходы Т104, Т106, Т121, Т123, Т125, Т127, Т129, Т131, Т133...Т178 таким образом, что каждый раз при увеличении количества маркеров в позиции Р41 на два, открывается каждый следующий переход из вышеперечисленного ряда. Открываясь, каждый следующий переход передает маркер в одну из позиций Р67-Р97, та, в свою очередь, закрывает предыдущий переход, и так до окончания процесса трелевки древесины на лесосеке.

Таким образом при уборке первой пары волоков, находящихся ближе всего к передней границе лесосеки, форвардер, каждый раз двигаясь по магистральному волоку, в незагруженном состоянии преодолевает один переезд, и, двигаясь в груженом состоянии, также преодолевает один переезд. Т.е. маркер перемещается из позиции Р8, обозначающей движение по магистральному волоку в лесосеке, в позицию Р40, обозначающую движение по участку магистрального волока между лесосекой

и погрузочной лесовозной площадкой, через переход Т24 с задержкой времени 18 с.

После уборки первой пары волоков, форвардер переходит к уборке двух последующих волоков. При их уборке, каждый раз, двигаясь по магистральному волоку в загруженном состоянии, форвардеру приходится преодолевать два переезда, т.е. прирост времени будет составлять уже тридцать шесть секунд.

В модели это выглядит следующим образом. После уборки первой пары волоков в позицию Р41 переходят два маркера, которые, в свою очередь, закрывают переход Т24 между позициями Р8 и Р40 и открывают переход Т103 между позициями Р8 и Р40. Соответственно маркер перемещается из позиции Р8 в Р40 с задержкой – тридцать шесть секунд.

В дальнейшем после уборки второй пары волоков и переезду на третью, в позицию Р41 переходят еще два маркера и текущая емкость позиции увеличивается до четырех. Тогда через переход Т104 в позицию Р67 переходит маркер, который, в

Таким же образом происходит дальнейшее увеличение времени, затрачиваемого на движение форвардера по магистральному волоку в загруженном состоянии.

Позиции Р98-Р128 и переходы Т181-Т141 составляют такой же механизм, увеличения времени движения по магистральному волоку при движении незагруженной машины. Прирост времени здесь составляет 11 секунд, что связано с большей скоростью движения незагруженной машины.

При выполнении построенной сети Петри были получены следующие основные результаты. Общее время, затрачиваемое на полное освоение рассмотренной лесосеки, составило 355,6 часа. При этом загрузка машин была не одинаковой (табл. 2).

Таблица 2

Загрузка машин

Ресурс	Время работы (ч)	Время простоя (ч)	Доля времени работы, %
Харвестер	346,6	9	97%
Форвардер	331,1	24,5	93%

В условиях рассматриваемой лесосеки большее значение имеет не абсолютная величина простоя, а распределение его во времени. Распределение промежутков работы и простоя харвестера и форвардера во времени показано на рис. 3.

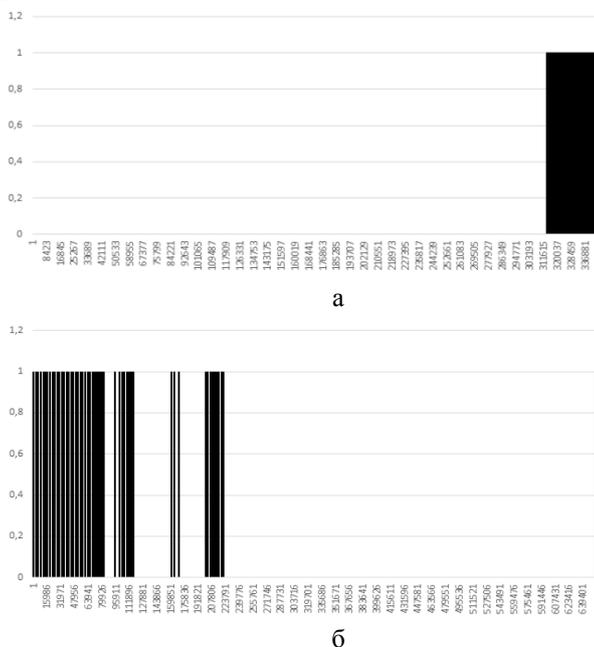


Рис. 3. Распределение промежутков работы и простоя машин во времени: а – харвестер; б – форвардер; белый сектор – работа; черный сектор – простой

Из рис. 3 видно, что промежутки простоя форвардера сосредоточены в первой трети общего времени работы на лесосеке, а единственный продолжительный период простоя харвестера – всамом конце работ. Это связано с постоянно уменьшающейся производительностью форвардера, вследствие увеличивающегося расстояния трелевки.

Это подтверждается графиком изменения объемов остатков древесины на волоках (рис. 4).

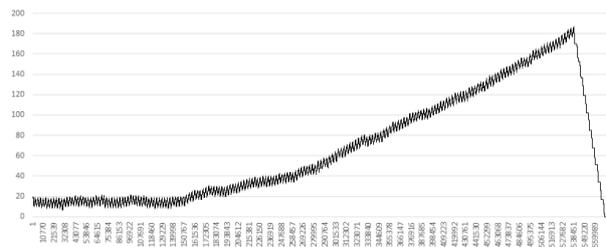


Рис. 4. Изменение объема заготовленной древесины на волоках (в последней стадии процесса заготовки)

В начальной стадии процесса разработки лесосеки производительность форвардера немного превышает производительность харвестера, что приводит к периодическим остановкам форвардера. В средней стадии производительности машин примерно равны. Таким образом, в этих двух стадиях роста объемов древесины на волоках не происходит. Однако в последней стадии процесса производительность форвардера становится меньше производительности харвестера, что приводит к постепенному увеличению запаса древесины на волоках, которое к моменту завершения работы харвестера превышает 180 куб. м. (рис. 4).

Таким образом, в результате имитационного моделирования было выявлено сравнительно неэффективное использование машин, входящих в комплекс (общий простой двух машин составил 33,5 часа).

Преимущество предложенного подхода заключается в том, что разработанная модель позволяет оценить различные варианты организации работ для последующего выбора более эффективного из них.

Так, авторы выдвинули предположение, что достичь более равномерной загрузки машин и увеличить производительность комплекса можно путем изменения технологии разработки лесосеки

закключаемся в том, что харвестер будет начинать работу не с ближних по отношению к погрузочной площадке пасек, а с дальних, находящихся в конце магистрального волока. Для проверки этого предположения в модель были внесены соответствующие изменения.

Выполненное моделирование показало, что в данном случае общее время, требуемое для выполнения лесозаготовительных работ на лесосеке, составляет 347,3 часа, что на 8,3 часа меньше, чем в исходном случае. Загрузка машин становится равномерной и приближается к 100 % (табл. 3).

Таблица 3
Загрузка машин после изменения технологии

Ресурс	Время работы (ч)	Время простоя (ч)	Доля времени работы, %
Харвестер	347	0,3	99,9%
Форвардер	347	0,3	99,9%

В случае применения данной технологии запас заготовленной древесины на волоках равномерно растет в первой половине периода работы и достигает максимума в 340 куб. м. После этого он также равномерно снижается до нуля к концу периода работ (рис. 5).

Выводы

Проведенное моделирование позволяет утверждать, что в случае перехода к предлагаемой технологии разработки лесосек, может быть достигнут рост производительности комплекса машин харвестер+форвардер на 2,3% за счет сокращения суммарного простоя машин до 0,6 часа (менее 1 %).

Можно рекомендовать применение такой технологии в случае лесосек с магистральным волоком значительной протяженности.

Таким образом, предложенный подход показал свою эффективность не только при решении задач выбора машин при формировании комплексов, но и при обосновании технологических решений.

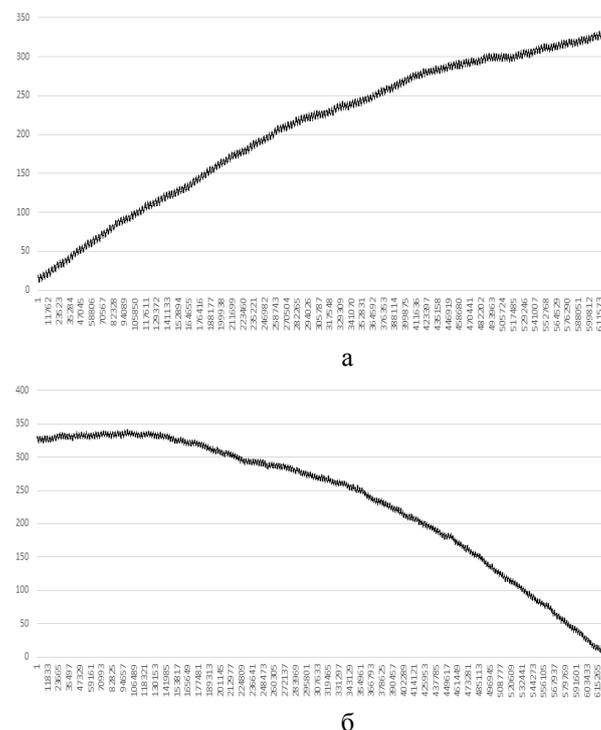


Рис. 5. Изменение объема заготовленной древесины на волоках после изменения технологии: а – первая половина процесса; б – вторая половина процесса

Библиографический список

1. Gerasimov, Y. Development trends and future prospects of cut-to-length machinery [Text] / Y. Gerasimov, A. Sokolov, V. Syuney // *Advanced Materials Research*. – 2013. – V. 705. – P. 468-473.
2. Jensen, K. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems [Text] / K. Jensen, L.M. Kristensen, L. Wells. // *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. - 2007. - Volume 9, Issue 3–4. - P. 213–254.
3. Shegelman, I. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia [Text] / I. Shegelman, P. Budnik, E. Morozov // *Lesn. Cas. For. J.* – 2015. – No. 61. – P. 211–220.
4. Гурьев А. Т. Основы моделирования работы комплексов лесосечных машин [Текст] / А. Т. Гурьев, А. А. Блок // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. - 2004. - № 3. - С. 116-125.
5. Макуев, В. А. Формирование парка лесосечных машин для лесозаготовительного предприятия [Текст]: моногр. / В. А. Макуев. – М., 2004. – 184 с.

6. Маммотов В. О. Методика формирования системы лесозаготовительных машин [Текст] / В. О. Маммотов, А. П. Мохирев // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т.1, №1. – С. 111-117.
7. Соколов А. П. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри [Текст] / А. П. Соколов, Е. В. Осипов // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т.7, №3. – С. 307-314.
8. Суханов Ю. В. Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация [Текст] / Ю. В. Суханов, А. А. Селиверстов, А. П. Соколов, С. Н. Перский // Resources and Technology. - 2012. - Т.9, № 1. - С. 58-61.
9. Сушков С. И. Разработка основ теории управления и принятия решений на предприятиях лесопромышленного комплекса [Текст] / С. И. Сушков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2012. - № 75. - С. 296-307.
10. Ширнин Ю. А. Моделирование процедуры выбора технологий рубок леса с использованием ГИС [Текст] / Ю. А. Ширнин, Н. И. Роженцова // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. - 2007. - № 1. - С. 40-49.
11. Шегельман, И. Р. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях [Текст] / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов // Ученые записки ПетрГУ. – 2010. – № 4. – С. 66-75.

References

1. Gerasimov Y., Sokolov A., Syuney V. Development trends and future prospects of cut-to-length machinery - Advanced Materials Research. 2013, Vol. 705, pp.468-473. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.705.468
2. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L.. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems - International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. Volume 9, Issue 3–4., pp. 213–254.
3. 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, 61, pp. 211-220.
4. Guriev A. T., Blok A. A. *Osnovy modelirovaniya raboty kompleksov lesosechnykh mashin* [Fundamentals of modeling the operation of wood harvesting machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeny. Lesnoy zhurnal*. [Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal]. 2004, no 3, pp. 116-125 (In Russian).
5. Makuev, V.A. *Formirovanie parka lesosechnykh mashin dlya lesozagotovitel'nykh predpriyatiy* [The formation of the Park, logging machinery for logging companies]. Moscow, 2004, 184 p (In Russian).
6. Mammotov V. O., Mokhrev A. P. *Metodika formirovaniya sistemy lesozagotovitelnykh mashin* [A method for wood harvesting machines set composition]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. 2017, vol. 1, no. 1, pp. 111-117 (In Russian).
7. Sokolov A. P., Osipov E. V. *Imitacionnoye modelirovaniye proizvodstvennogo processa zagotovki drevesiny s pomoshh'yu setey Petri* [Simulation modeling of the wood harvesting processes using Petri Nets] *Lesotekhnicheskyy zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. 2017, vol. 7, no. 3, pp. 307-314 (In Russian).
8. Sukhanov Yu. V., Seliverstov A. A., Sokolov A. P., Persky S. N. *Imitatsionnoye modelirovaniye operatsiy trelevki forvarderom: algoritmy i realizatsiya* [Simulation modeling of forwarding operations: algorithms and implementation]. Resources and Technology, 2012, Vol.9, no 1, pp. 58-61 (In Russian).
9. Sushkov S. I. *Razrabotka osnov teorii upravleniya i prinyatiya resheniy na predpriyatiyah lesopromyshlennogo kompleksa* [Development of the foundations of the theory of management and decision-making at the enterprises of the forest complex]. *Politematicheskyy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University]. 2012, no 75, pp. 296-307 (In Russian).

10. Shirnin Yu. A., Rozhenzova N. I. *Modelirovanie procedury vybora tehnologij rubok lesa s ispol'zovaniem GIS* [Modeling of the selecting procedure for wood harvesting technologies using GIS]. *Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* [Vestnik of the Mari State University]. 2007. no 1. pp. 40-49 (In Russian).

11. Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V. *Analiz pokazateley raboty i otsenka effektivnosti lesozagotovitel'nykh mashin v razlichnykh prirodno-proizvodstvennykh usloviyakh* [The performance analysis and evaluation of the effectiveness of forest machines in different natural production conditions] *Uchenyey zapiski PetrGU* [PetrGU's scientific notes]. 2010, no.4, pp. 66-75 (In Russian).

Сведения об авторах

Соколов Антон Павлович – профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», доктор технических наук, доцент, г. Петрозаводск, Российская Федерация; e-mail: a_sokolov@psu.karelia.ru.

Осипов Евгений Вадимович – студент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация; e-mail: jekispank@mail.ru.

Information about authors

Sokolov Anton Pavlovich – Professor of Department of transporting and technology machinery and equipment, Petrozavodsk State University, DSc in Engineering, Associate Professor, Petrozavodsk, Russian Federation; e-mail: a_sokolov@psu.karelia.ru.

Osipov Evgeny Vadimovich – student of Department of transporting and technology machinery and equipment, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation; e-mail: jekispank@mail.ru.