

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ СИНХРОНИЗАЦИИ МАШИН В СИСТЕМЕ ДЛЯ ЗАГОТОВКИ СОРТИМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЛИСТВЕННОГО ХОЗЯЙСТВА ПРИ РАБОТЕ С СОРТИРОВКОЙ

М.А. Тетерина

Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

tetatet-marya@mail.ru

Представлены результаты эксперимента по оценке факторов синхронизации машин в системе «харвестер — форвардер» при заготовке лиственных сортиментов. Эксперимент проведен в марте 2014 г. на базе арендуемых лесных участков и парка машин (харвестер John Deer 1470D и форвардер Komatsu 830.3) ООО «Лестех». Эксперимент выполнен на основе центрального ротатбельного композиционного плана. В ходе эксперимента зафиксированы простои харвестера. Средний процент простоев харвестера составил 76,21. По результатам дисперсионного анализа установлено, что в условиях лиственного древостоя такие факторы синхронизации машин, как рейсовая нагрузка транспортной машины и расстояние трелевки, являются статистически значимыми: уровень значимости при оценке по критерию Фишера не превышает 0,27 %. Изложенное подтверждено также результатами оценки эффектов факторов эксперимента на основе *t*-критерия и оценки параметров модели регрессии для стандартизованных и исходных значений уровней факторов. Соответствующие данным результатам значения коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации составили соответственно $R^2 = 0,9956$ и $R^2_{кор} = 0,99011$, что свидетельствует о высокой дисперсии, обусловленной выбранной экспериментальной моделью. Представлена полученная на основании данных результатов зависимость отклика эксперимента (доля простоев машин в системе) от упомянутых факторов, которая проиллюстрирована трехмерным и контурным графиками. Степень соответствия полученной зависимости экспериментальным данным продемонстрирована на диаграмме рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений отклика. Достоверность результатов дисперсионного анализа подтверждена нормальным вероятностным графиком остатков. Даны рекомендации по снижению простоев харвестера в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: синхронизация, эксперимент, рейсовая нагрузка, расстояние трелевки, лиственное хозяйство, дисперсионный анализ, регрессионное уравнение

Ссылка для цитирования: Тетерина М.А. Экспериментальное исследование факторов синхронизации машин в системе для заготовки сортиментов в условиях лиственного хозяйства при работе с сортировкой // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 12–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-12-16

Синхронизация машин в системах заготовки сортиментов [1] обеспечивается соответствующими значениями интенсивности операций технологического процесса [2, 3], которые определяются природно-производственными условиями, в том числе таксационными характеристиками древостоя, такими, например, как породный состав. Экспериментальные исследования, проведенные в условиях хвойных древостоев [4, 5], свидетельствуют о значительных простоях харвестеров и возможности их снижения за счет управления рейсовыми нагрузками форвардеров и расстояниями трелевки [6, 7]. Для оценки процента простоев и исследования факторов синхронизации машин при заготовке лиственных сортиментов при наличии операции сортировки по породам выполнен соответствующий эксперимент.

Цель и методика исследований

Эксперимент проведен с участием магистранта Д.О. Погудина в марте 2014 г. на территории Зенковского участкового лесничества ГКУ СО «Алапаевское лесничество» на базе арендуемых лесных участков (квартал 264, выдел 2, площадь 7 га)

и парка машин (харвестер John Deer 1470D и форвардер Komatsu 830.3) ООО «Лестех» в следующих природно-производственных условиях: способ рубки — санитарная, вид рубки — главное пользование, способ трелевки — в сортиментах, хозяйство мягколиственное, состав древостоя ББЗЕ1К+С, высота 20 м, диаметр 20 см. Технологическая схема разработки лесосеки представлена на рис. 1.

Результаты исследований

Результаты эксперимента, выполненного на основе центрального ротатбельного композиционного плана [8], представлены в табл. 1. В ходе эксперимента установлено, что в условиях лиственного хозяйства при работе с подсортировкой простаивает харвестер.

Для анализа зависимости между откликом (процент простоев машин, P) и факторами (расстояние трелевки L , м и рейсовая нагрузка форвардера Q , шт.) эксперимента использована модель второго порядка с оценкой главных эффектов и эффектов взаимодействия. Результаты дисперсионного анализа [8] экспериментальных

Таблица 1

Результаты эксперимента по оценке факторов синхронизации лесозаготовительных машин
The results of an experiment assessing the factors of the synchronization of harvesters

Рейсовая нагрузка форвардера Q , шт.	Расстояние трелевки L , м	Процент простоев машин, P
75	724	0,736
75	774	0,760
90	724	0,812
90	774	0,744
72	749	0,785
94	749	0,845
83	714	0,729
83	784	0,700
83	749	0,760
83	749	0,750

данных (табл. 2) подтверждают адекватность выбранной экспериментальной модели и свидетельствуют о том, что все исследуемые эффекты являются статистически значимыми: уровень значимости при оценке по критерию Фишера не превышает 0,27 %.

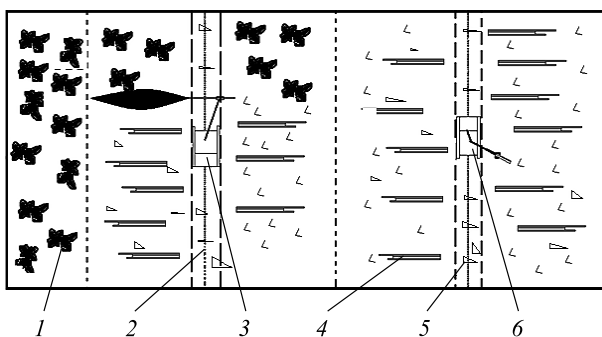


Рис. 1. Схема разработки лесосеки: 1 — растущий лес; 2 — волок; 3 — харвестер; 4 — сортименты; 5 — порубочные остатки; 6 — форвардер
Fig. 1. Scheme for the yarding of the cutting area: 1 — growing forest; 2 — fiber; 3 — harvester; 4 — assortments; 5 — felling remains; 6 — forwarder

Достоверность результатов дисперсионного анализа подтверждается нормальным вероятностным графиком остатков (рис. 2). Из графика видно, что наблюдаемые и ожидаемые нормальные значения остатков после их упорядочивания по возрастанию укладываются на прямую, следовательно, соблюдается предположение нормальности распределения остатков, на котором основаны оценки параметров дисперсионного анализа.

Результаты оценки эффектов факторов эксперимента на основе t -критерия и соответствующие

Таблица 2

Дисперсионный анализ данных эксперимента

Results of variance analysis of experimental data

Исследуемый эффект	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средние квадраты отклонений	Критерий Фишера F	Уровень значимости α
Линейный эффект рейсовой нагрузки Q	0,002062	1	0,002062	117,2485	0,000413
Квадратичный эффект рейсовой нагрузки Q^2	0,004201	1	0,004201	238,8947	0,000102
Линейный эффект расстояния L	0,000769	1	0,000769	43,7324	0,002711
Квадратичный эффект расстояния L^2	0,001747	1	0,001747	99,3790	0,000569
Эффект взаимодействия расстояния и рейсовой нагрузки $Q-L$	0,002128	1	0,002128	121,0141	0,000388
Ошибка	0,000070	4	0,000018	—	—
Сумма квадратов отклонений	0,016002	9	—	—	—

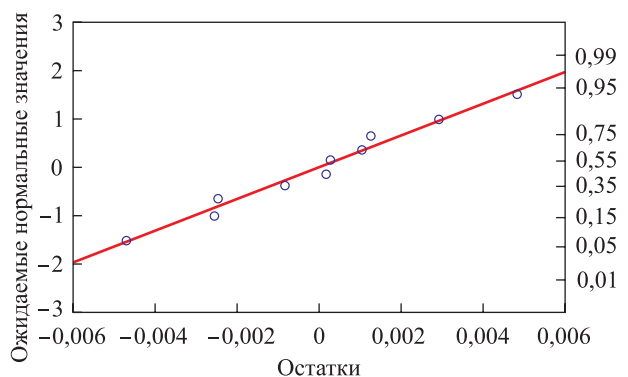


Рис. 2. Нормальный вероятностный график остатков
Fig. 2. The normal probability chart of the residues

результаты оценки параметров модели регрессии [8] для стандартизированных значений уровней факторов (табл. 3) подтверждают их высокую значимость. Соответствующие данным результатам значения коэффициента детерминации $R^2 = 0,9956$ и скорректированного коэффициента детерминации $R^2_{кор} = 0,99011$ свидетельствуют о высокой дисперсии, обусловленной выбранной экспериментальной моделью.

В соответствии с результатами оценки параметров модели регрессии для исходных значений

Т а б л и ц а 3

**Оценка эффектов факторов эксперимента и параметров модели регрессии
для стандартизированных значений уровней факторов**
The results of the evaluation of the effects of experimental factors and the parameters of the regression model
for standardized values of factor levels

Параметр	Эффект	Стандартная ошибка оценки	t-критерий (число степе- ней свободы $df=4$)	Уровень значи- мости α	Стандартизиро- ванный коэффи- циент регрессион- ного уравнения	Стандартная ошибка оценки
Свободный член	0,753539	0,002959	254,6185	0,000000	0,753539	0,002959
Q	0,031590	0,002917	10,8281	0,000413	0,015795	0,001459
Q^2	0,056995	0,003688	15,4562	0,000102	0,028498	0,001844
L	-0,019729	0,002983	-6,6130	0,002711	-0,009864	0,001492
L^2	-0,039978	0,004010	-9,9689	0,000569	-0,019989	0,002005
QL	-0,046079	0,004189	-11,0006	0,000388	-0,023039	0,002094

Т а б л и ц а 4

Оценка параметров модели регрессии для исходных значений уровней факторов
The results of estimating the parameters of the regression model for the initial values of the factor levels

Параметр	Коэффициент регрессионного уравнения	Стандартная ошибка оценки	t-критерий (число степе- ней свободы $df=4$)	Уровень значимости α	Нижняя грани- ца доверитель- ного интервала ($\alpha = 0,95\%$)	Верхняя грани- ца доверитель- ного интервала ($\alpha = 0,95\%$)
Свободный член	-21,2115	2,028571	-10,4564	0,000473	-26,8438	-15,5793
Q	0,0105	0,009972	1,0577	0,349833	-0,0171	0,0382
Q^2	0,0005	0,000033	15,4562	0,000102	0,0004	0,0006
L	0,0577	0,004894	11,7794	0,000297	0,0441	0,0712
L^2	-0,00003	0,000003	-9,9689	0,000569	-0,0000	-0,0000
QL	-0,00012	0,000011	-11,0006	0,000388	-0,0002	-0,0001

уровней факторов (табл. 4) зависимость отклика эксперимента от факторов в рассматриваемых условиях описывается следующим выражением

$$P(Q, L) = -21,212 + 0,011Q + 0,0005Q^2 + 0,058L - 0,00003L^2 - 0,00012QL. \quad (1)$$

Коэффициенты представленной модели регрессии высоко значимы, за исключением коэффициента линейной зависимости между процентом простоев системы и рейсовой нагрузкой, который значим на уровне 0,3498. Изложенное соответствует сущности исследуемого процесса и согласуется с используемой для теоретических исследований моделью массового обслуживания [9, 10], в которой вероятность простоев системы описывается нелинейной зависимостью от рейсовой нагрузки.

Полученная экспериментальная зависимость (1) проиллюстрирована трехмерным и контурным графиками поверхности отклика (рис. 3, 4). Достаточно высокая степень соответствия зависимости (1) экспериментальным данным продемон-

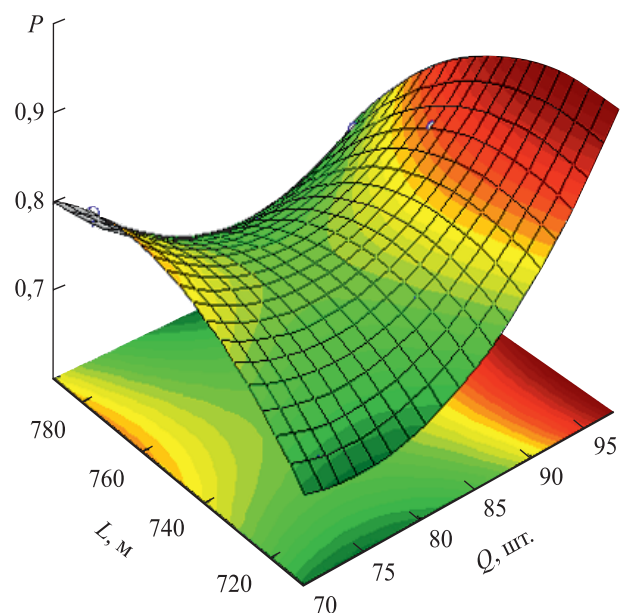


Рис. 3. График поверхности отклика эксперимента
Fig. 3. Graph of the response surface of the experiment

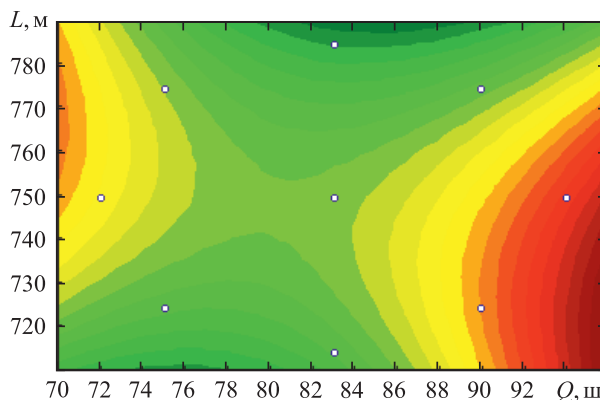


Рис. 4. Контурный график поверхности отклика эксперимента

Fig. 4. Contour plot of the response surface of the experiment

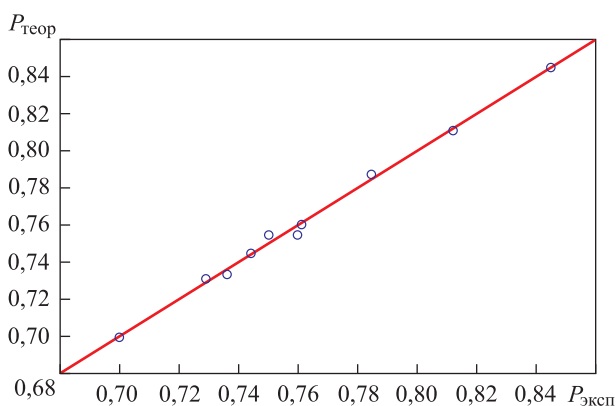


Рис. 5. Диаграмма рассеивания ожидаемых (предсказанных) $P_{теор}$ и экспериментальных $P_{эсп}$ значений вероятности простоев системы

Fig. 5. Diagram of dispersion of expected (predicted) and the experimental values of the probability of downtime of the system

стрирована на диаграмме рассеивания [8] наблюдаемых и предсказанных значений вероятности простоев (рис. 5), точки которой располагаются близко к прямой линии.

Выводы и рекомендации

1. В качестве факторов синхронизации машин при заготовке листовых сортиментов при работе с сортировкой могут рассматриваться рейсовая нагрузка транспортной машины и расстояние трелевки — указанные факторы по результатам дисперсионного анализа определены как статистически значимые.

Сведения об авторах

Тетерина Мария Александровна — канд. техн. наук, доцент Уральского государственного лесотехнического университета, tetatet-marya@mail.ru

2. В ходе эксперимента по оценке синхронизации машин для заготовки сортиментов в условиях листового хозяйства при работе с сортировкой зафиксированы простои харвестера, средняя величина простоев 76,21 %.

3. Для снижения простоев харвестера в рассматриваемых условиях могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- изменение схемы разработки лесосеки с целью снижения среднего расстояния трелевки;
- изменение способа работы харвестера, например, использование технологии с сохранением подроста;
- использование форвардера с большей грузоподъемностью.

Список литературы

- [1] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Синхронизация обрабатывающе-транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. 201 с.
- [2] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Управление схемами работы машин в обрабатывающе-транспортных лесозаготовительных системах // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2010. № 6. С. 78–82.
- [3] Тетерина М.А. Экологически щадящие, ресурсосберегающие транспортно-обрабатывающие системы: управление схемами работы машин // Фундаментальные исследования, 2011. № 8. Ч. 1. С. 178–184.
- [4] Якимович С.Б., Тетерина М.А., Груздев В.В. Опыт-но-промышленная оценка эффективности нового способа заготовки сортиментов // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2013. № 1 (92). С. 192–196.
- [5] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Экспериментальная оценка синхронизации обрабатывающе-транспортной системы «харвестер–форвардер» // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2008. № 4. С. 48–51.
- [6] Тетерина М.А. Постановка и решение задачи оптимизации параметров обрабатывающе-транспортной системы «харвестер–форвардер» // Известия СПбГЛТА, 2008. Вып. 183. С. 100–107.
- [7] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Оптимизация рейсовой нагрузки форвардера // Известия СПбГЛТА, 2007. Вып. 180. С. 126–132.
- [8] Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.
- [9] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Моделирование стохастических обрабатывающе-транспортных систем с переменными запасами // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2007. № 6. С. 71–77.
- [10] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Рейсовая нагрузка лесозаготовительных машин // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6. С. 95–97.

Статья поступила в редакцию 19.04.2017 г.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MACHINES SYNCHRONIZATION FACTORS IN THE SYSTEM FOR LOGGING IN DECIDUOUS SPECIES FACILITIES SITUATIONS WHEN WORKING WITH SORTING

M.A. Teterina

Ural State Forest Engineering University, Sibirsky tract, 37, Ekaterinburg, Russia, 620100

tetatet-marya@mail.ru

The article presents the results of experiment to estimate machines synchronization factors in the «harvester — forwarder» system within deciduous logging. The experiment was carried out in March 2014 on a basis of rented forest areas and machines park (harvester John Deer 1470D и forwarder Komatsu 830.3) of LLC «Lestech». The experiment was performed on the basis of central rotatable composite plan. During the experiment there were recorded harvester downtimes. The average percentage of harvester downtime amounted to 76,21 %. According to the results of a variance analysis it is estimated that such machines synchronization factors as transport machine regular load and skidding distance are statistically significant: the level of significance when evaluating the Fisher test is limited to 0,27 %. It was also confirmed by the results of the evaluation of effects of factors of the experiment on a basis of t-criterion and by the results of the evaluation regression model parameters for standardized and original values of the factor levels. Corresponding to this results values of coefficient of determination and adjust coefficient of determination had amounted accordingly $R^2 = 0,9956$ и $R^2_{cor} = 0,99011$, that indicates a high rate of variance explained on the basis of selected experimental model. The article presents the obtained on the basis of these results dependence of response of the experiment (the share of machine idle time in system) from the factors, which illustrated three-dimensional and contour plots. The degree of conformity obtained according to the experimental data is demonstrated on the scatter plot of the observed and predicted values of the response. The reliability of the results of analysis of variance confirmed a normal probability graph of the residues. Recommendations to reduce downtime of the harvester under these conditions are given.

Keywords: synchronization, experiment, regular load, skidding distance, deciduous facilities, variance analysis, regression equation

Suggested citation: Teterina M.A. *Экспериментальное исследование факторов синхронизации машин в системе для заготовки сортиментов в условиях лиственного хозяйства при работе с сортировочной* [Experimental investigation of machines synchronization factors in the system for logging under deciduous facilities situations when working with sorting]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 12–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-12-16

References

- [1] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Sinkhronizatsiya obrabatyvayushche-transportnykh sistem zagotovki i pervichnoy obrabotki drevesyiny* [Processing-transporting systems of harvesting and primary wood processing synchronization] Yoshkar-Ola, 2011, 201 p.
- [2] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Upravlenie skhemami raboty mashin v obrabatyvayushche-transportnykh lesozagotovitel'nykh sistemakh* [Machines working schemes control in transporting-processing forest harvesting systems] Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2010, no. 6, pp. 78–82.
- [3] Teterina M.A. *Ekologicheski shchadyashchie, resursosberegayushchie transportno-obrabatyvayushchie sistemy: upravlenie skhemami raboty mashin* [Ecologically sparing, recourse saving transporting-processing systems: machines working schemes control] Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research] Penza: RAE, 2011, no. 8, t. 1, pp. 178–184.
- [4] Yakimovich S.B., Teterina M.A., Gruzdev V.V. *Opytno-promyshlennaya otsenka effektivnosti novogo sposoba zagotovki sortimentov* [Experimental-industrial estimation of new round timber logging method efficiency] Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, no. 1(92), pp. 192–196.
- [5] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Экспериментальная оценка синхронизации системы «харvester–forwarder»* [Experimental estimation of processing-transporting system «harvester–forwarder» synchronization] Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2008, no. 4, pp. 48–51.
- [6] Teterina M.A. *Postanovka i reshenie zadachi optimizatsii parametrov obraba-tyvayushche-transportnoy sistemy «kharvester–forvader»* [Setting and decision of processing-transporting system «harvester–forwarder» parameters optimization proposition] Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. Stat'i molodykh uchenykh, podgotovlennye na osnove dokladov [Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy. Articles of young scientists, prepared on the basis of reports], 2008, v. 183, no. 14, pp. 100–107.
- [7] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Optimizatsiya reysovoy nagruzki forvardera* [Forwarder scheduled loading optimization] Izvestiya SPbGLTA [Proceedings of St. Petersburg state forestry engineering Academy], 2007, iss. 180, pp. 126–132.
- [8] Borovikov V.P. *Statistica: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [Statistica: the art of data analysis on the computer. For experts] SPb.: Piter, 2001, 656 p.
- [9] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Modelirovanie stokhasticheskikh obrabatyvayushche-transportnykh sistem s peremeshchaemymi zapasami* [Modelling of stochastic processing-transporting systems with transporting stock] Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2007, no. 6, pp. 71–77.
- [10] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Reysovaya nagruzka lesozagotovitel'nykh mashin* [Regular load of logging machines] Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik, 2006, no. 6, pp. 95–97.

Author's information

Teterina Mariya Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Ural State Forest Engineering University, tetatet-marya@mail.ru

Received 19.04.2017