

О ВЛИЯНИИ ЧАСТИЧНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ НА ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

А.П. Соколов[✉], А.А. Селиверстов, Ю.В. Суханов, В.А. Сенькин

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

a_sokolov@psu.karelia.ru

Приведен анализ влияния опции IBC (Intelligent Boom Control) для частичной автоматизации управления манипуляторами машин марки John Deere на рабочий цикл и тяжесть труда их операторов. Исследованы две машины, оснащенные системами IBC в полевых условиях. Выявлены различия в частоте и продолжительности использования органов управления телескопическим удлинителем стрелы. Определено, что в результате автоматизации одна из степеней свободы органов управления манипулятором форвардера практически полностью исключена из использования (уменьшение примерно в 10 раз). Установлено значительное сокращение (примерно в 2 раза) продолжительности использования этой же степени свободы органов управления манипулятором харвестера, что экономит психофизиологические ресурсы операторов для более эффективного использования оставшихся степеней свободы, а также совместно с более простой и интуитивно понятной логикой работы органов управления повышает производительность, точность и безопасность работы. Показано, что более простой алгоритм работы снижает уровень стереотипности действий оператора, степень его усталости и рассеянности, которые обычно проявляются ближе к концу смены.

Ключевые слова: лесные машины, автоматизация, рабочий цикл, манипулятор, сортиментная заготовка древесины, эргономика

Ссылка для цитирования: Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152

Основной технологией, применяемой в России на лесозаготовках в настоящее время, является сортиментная технология, базирующаяся на использовании системы машин — харвестер + форвардер [1]. Харвестер представляет собой многооперационную валочно-сучкорезно-раскряжевочную машину (ВСРМ), которая осуществляет валку дерева, подтаскивание его к волоку, обрезку сучьев, а также отмер длины с последующим поперечным делением ствола дерева на отдельные бревна — сортименты. Форвардер является транспортной машиной, основная задача которой заключается в сборе сортиментов заготовленных харвестером с последующей их транспортировкой к погрузочной площадке, расположенной у лесной автомобильной дороги. Кроме того, форвардер обычно производит сортировку лесоматериалов по размерам, породам и назначению, располагая их у дороги в разные штабеля для дальнейшей погрузки на автомобильный транспорт.

В составе технологического оборудования харвестера и форвардера присутствуют мощные и маневренные гидравлические манипуляторы, использование которых делает возможным управление каждой из машин только одним оператором.

Совершенство конструкций манипулятора, его приводов и системы управления оказывает очень большое влияние на производительность и общую эффективность эксплуатации машин [2–6]. Именно поэтому все производители харвестеров и форвардеров постоянно ведут работы по выявлению новых возможностей повышения эффективности и точности применяемых манипуляторов.

Можно выделить три основных направления совершенствования манипуляторов. Первое направление заключается в совершенствовании конструкции самого манипулятора в отношении его кинематики, общего числа и размеров звеньев, конструкций и расположения шарниров, повышения вылета, маневренности, прочности и надежности конструкции и т. д. [7, 8]. Второе направление связано с совершенствованием приводных механизмов и в целом гидросистемы машин в целях повышения грузоподъемности, скорости и точности выполнения технологических операций [9, 10]. Третье перспективное и активно развивающееся в последнее время направление базируется на использовании возможностей автоматизации управления манипулятором для повышения его производительности.

В настоящее время активно развиваются подходы к совершенствованию систем управления

манипуляторами лесозаготовительных машин, которые способны обеспечить высокую степень автоматизации, приближающуюся к уровню полностью автоматической работы промышленных роботов-манипуляторов. Эти подходы базируются на идентификации наиболее выгодных с точки зрения производительности траекторий движения рабочих органов и их реализации в автоматическом режиме с минимальным контролем со стороны операторов [11–14]. Однако следует отметить, что эти подходы пока существуют в виде теоретических разработок, некоторые — в виде лабораторных исследовательских установок, но реальное применение еще не достигнуто [15].

Некоторое время тому назад на серийных машинах нескольких крупных производителей появились интересные опции, базирующиеся на так называемой частичной автоматизации, позволяющей несколько облегчить работу оператора и повысить эффективность и производительность машины в целом [16–18]. Харвестеры и форвардеры, оснащенные данными опциями, в настоящее время уже активно используются лесозаготовительными компаниями, что позволяет в реальных условиях оценить их влияние на различные аспекты эксплуатации.

Одним из таких аспектов является вероятное снижение нагрузки на операторов машин за счет автоматизации выполнения отдельных функций, что представляется важным и, несомненно, должно быть проанализировано с точки зрения эргономики. До появления современных многооперационных машин условия труда рабочих, занятых на лесозаготовках, нельзя было назвать комфортными [19–21]. Работа зачастую выполнялась вне помещений или кабин машин под воздействием всего спектра погодных факторов, сильно отличающихся от сезона к сезону. Используемые технические средства характеризовались повышенным шумом и вибрационным воздействием, кабины машин не оснащались достаточно эффективными климатическими установками, во вдыхаемом воздухе могли содержаться выхлопные газы, а также испарения технических жидкостей и т. п.

Большим преимуществом современных многооперационных машин стало повышение комфортности рабочих мест операторов, которые по комфорту не уступают легковым автомобилям последних моделей. Однако значительно увеличилась алгоритмическая сложность рабочего цикла операторов, а также монотонность труда [22], что часто способствует ускоренному накоплению усталости и, как следствие, приводит к снижению работоспособности операторов и уменьшению производительности труда. Операторы часто испытывают определенное психологическое воздействие, связанное с нахождением длительное

время в одиночестве в лесу, особенно при работе в ночную смену [23, 24]. Таким образом, любые меры, направленные на снижение тяжести труда операторов лесозаготовительных машин, важны не только с точки зрения повышения производительности, но и с точки зрения безопасности и охраны здоровья работников. Кроме того, это может способствовать повышению привлекательности профессии оператора лесозаготовительной машины, что немаловажно в условиях дефицита квалифицированных кадров, с которым сталкиваются многие компании в данном сегменте рынка.

Цель работы

Цель работы — анализ влияния опции Intelligent Boom Control (IBC) харвестеров и форвардеров компании John Deere, которая позволяет осуществлять частичную автоматизацию работы манипуляторов, на рабочий цикл и тяжесть труда операторов, управляющих этими машинами.

Материалы и методы

Подход к частичной автоматизации, который в настоящее время реализован ведущими производителями таких лесных машин, как John Deere и Ponsse, получил название «Boom-tip control» (BTC) [25]. На русский язык это можно перевести как «Управление концом рукояти».



Рис. 1. Форвардер John Deere 1510G
Fig. 1. Forwarder John Deere 1510G

При использовании обычной системы управления без автоматизации (Conventional Boom Control (CBC)) оператор с помощью органов управления машиной (джойстиков) управляет перемещением каждого звена манипулятора по-отдельности. Чаще всего и на харвестерах и на форвардерах используются четырехзвенные манипуляторы, состоящие из колонны, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя рукояти (рис. 1). Колонна может поворачиваться вокруг вертикальной оси, стрела шарнирно сочленена с колонной, а рукоять со стрелой. Вращение стрелы



Рис. 2. Основные органы управления манипулятором
Fig. 2. The main controls of the manipulator

и рукояти происходит вокруг горизонтальных осей. Телескопический удлинитель может совершать возвратно-поступательные движения, т. е. выдвигаться и вдвигаться, изменяя общую длину рукояти.

Основные органы управления манипулятором представляют собой два джойстика, на каждом из которых имеется дополнительная двухпозиционная кнопка-клавиша (рис. 2). Как правило, на всех машинах отклонение левого джойстика вправо-влево управляет поворотом колонны вокруг вертикальной оси, отклонение левого джойстика вперед-назад отвечает за поворот рукояти относительно стрелы, а кнопка-клавиша на левом джойстике выдвигает и задвигает удлинитель рукояти. Отклонение правого джойстика вправо-влево управляет поворотом рабочего органа (грейферного захвата или харвестерной головки) вокруг вертикальной оси, отклонение правого джойстика вперед-назад отвечает за подъем или опускание стрелы, а кнопка-клавиша на правом джойстике управляет рабочим органом.

Системы управления, реализующие принцип «Boom-tip control» изменяют стандартную логику управления таким образом, что отдельное и однонаправленное воздействие на определенный орган управления в некоторых случаях может приводить к одновременной работе приводов нескольких звеньев манипулятора для обеспечения перемещения рабочего органа, расположенного на конце рукояти, по какой-либо заранее заданной траектории, обычно прямолинейной.

В настоящей статье описаны результаты исследования работы ВТС на примере машин John Deere, оснащенных системой Intelligent Boom Control (IBC) [16], которая изменяет логику управления следующим образом. При ее использовании отклонение левого джойстика вперед-назад вызывает совместное действие приводов стрелы, рукояти



Рис. 3. Харвестер John Deere 1270G
Fig. 3. Harvester John Deere 1270G

и телескопического удлинителя, приводящее к прямолинейному перемещению рабочего органа вперед-назад условно параллельно земной поверхности. Таким же образом отклонение правого джойстика вперед-назад вызывает совместное действие приводов, которое обеспечивает прямолинейные подъем или опускание рабочего органа условно перпендикулярно земле. В остальном логика работы органов управления остается неизменной. В результате управление становится более простым и интуитивно понятным. Кроме того, теоретически вообще пропадает необходимость использования левой кнопки-клавиши, управляющей телескопическим удлинителем рукояти.

Сбор данных для оценки влияния системы ИВС на рабочий цикл операторов был проведен в полевых условиях. Исследовались две машины, оснащенные системами ИВС: харвестер John Deere 1270G (эксплуатационная масса 20 650 кг; мощность двигателя 190 кВт; колесная формула 6×6; манипулятор СН 710; харвестерная головка Н480С) (рис. 3) и форвардер John Deere 1510G (эксплуатационная масса 18 230 кг; мощность двигателя 164 кВт; колесная формула 8×8; манипулятор CF 710; грейферный захват FX-26 (LogLift)) (см. рис. 1).



Рис. 4. Место проведения полевых исследований
Fig. 4. Location of field research

Полевые исследования проводились в августе 2021 г. в Муезерском районе Республики Карелия Российской Федерации (рис. 4). При этом выполнялась сплошная рубка на лесосеке с типичным для Карелии разновозрастным смешанным древостоем состава 8С2Е+Б+Ос. В исследовании применялись относительно новые лесозаготовительные машины с наработкой около 5,4 тыс. мото-час.

В исследовании приняли участие профессиональные операторы, постоянно работающие на рассматриваемых машинах. При этом опыт работы оператора харвестера составил 10 лет, оператор форвардера отработал на подобных машинах 18 лет. Оба оператора ранее активно работали на лесосечных машинах без ИВС. Опыт работы обоих операторов на машинах с ИВС составил около одного года. Для того чтобы исключить влияние технического состояния оборудования на результаты исследования, перед их началом с участием независимого инструктора службы технической поддержки и обучения компании-дилера John Deere была выполнена проверка и настройка манипуляторов обеих машин в соответствии со спецификациями производителя.

В качестве метода сбора информации о рабочем цикле операторов при использовании основных органов управления манипуляторами (джойстиком) была применена видеосъемка в кабине машин с последующим камеральным хронометрическим анализом полученных видеозаписей. Как было отмечено выше, использование ИВС оказывает наибольшее влияние на

функцию выдвигания и втягивания телескопического удлинителя вплоть до полной автоматизации данных процессов, что предположительно должно существенно сократить частоту или полностью исключить использование соответствующего органа управления — кнопки-клавиши на левом джойстике. Остальные органы управления продолжают использоваться практически с той же интенсивностью, изменяется лишь характер отклика манипулятора на некоторые отклонения джойстиков. По этой причине данное исследование было целиком посвящено сравнению параметров использования кнопки-клавиши, отвечающей за выдвигание телескопического удлинителя при включенной и выключенной системе ИВС.

Наблюдение за работой операторов и видеосъемку осуществляли в неизменных природно-производственных условиях на одной и той же делянке. При этом сначала операторы осуществляли работу при выключенной системе ИВС. Для харвестера время видеозаписи составляло около 1 ч, а для форвардера съемка велась в течение одного цикла, включающего в себя погрузку, движение с грузом к погрузочной площадке и разгрузку. Затем система ИВС включалась, и процесс повторялся в течение того же самого времени (цикла) для каждой машины.

Полученные видеозаписи были проанализированы в камеральных условиях. При этом с точностью до 0,1 с фиксировались моменты нажатия оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем и моменты возврата ее в исходное положение, что в дальнейшем позволило определить частоту и продолжительность использования этого органа управления в случаях работы с деактивированной и активированной ИВС.

Результаты и обсуждение

Харвестер. После исключения из видеозаписей времени, затраченного на подготовительные и заключительные операции, а также времени кратковременных технологических остановок машины, к анализу были приняты фрагменты продолжительностью 37 мин 36 с для харвестера с деактивированной системой ИВС и 60 мин 9 с для харвестера с активированной системой ИВС.

При этом у харвестера с деактивированной системой ИВС на протяжении всего видеофрагмента (37 мин 36 с) было зафиксировано 200 нажатий оператором на кнопку управления телескопическим удлинителем, а с активированной число нажатий составило 246 за 60 мин 9 с.

На рис. 5 приведено распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим

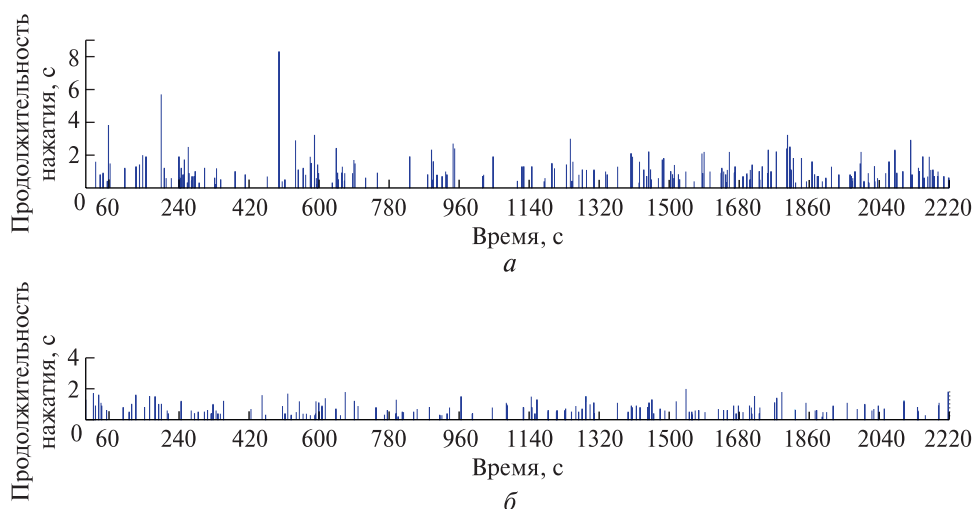


Рис. 5. Распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем: *a* — харвестер без ИВС; *б* — харвестер с ИВС
Fig. 5. Distribution of moments and duration of pressing by the operator on the control button of the telescopic extension: *a* — harvester without IBC; *б* — harvester with IBC

удлинителем: по оси абсцисс отложено время наблюдения, а по оси ординат — продолжительность зафиксированного однократного нажатия на кнопку. Таким образом, можно оценить моменты начала нажатий по положению штрихов, а продолжительность нажатий — по длине штрихов. Для удобства сравнения оба графика приведены для первых 37 мин наблюдений.

Общие результаты анализа показывают, что использование системы ИВС заметно сокращает частоту и продолжительность использования органа управления телескопическим удлинителем (табл. 1). Средняя частота использования кнопки на левом джойстике сократилась на 24,4 % — с 5,41 до 4,09 нажатий в минуту, средняя продолжительность однократного нажатия сократилась почти на треть (31,4 %), суммарная продолжительность всех нажатий, происходящих в течение одного часа, сократилась почти в 2 раза (на 47,8 %) с 6,38 мин до 3,33 мин. Средний период между нажатиями кнопки увеличился на 32,1 % — с 11,15 с до 14,73 с.

Графики, приведенные на рис. 6, иллюстрируют степень интенсивности роста суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши при деактивированной и активированной ИВС, что позволяет наглядно продемонстрировать эффект от ее использования.

Проведенный статистический анализ показал, что продолжительность однократного нажатия на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем имеет логнормальное распределение с достаточно высокими значениями достигнутого уровня значимости как в случае активированной, так и в случае деактивированной системы ИВС (табл. 2, рис. 7, *a*, *в*).

Т а б л и ц а 1

Общие результаты для харвестера
Overall results for the harvester

Показатель	Харвестер без ИВС	Харвестер с ИВС	Разность
Средняя продолжительность нажатия, с	1,18	0,81	−0,37 (−31,4 %)
Среднеквадратическое отклонение продолжительности нажатия, с	0,897	0,461	−0,436 (−48,6 %)
Максимальная продолжительность нажатия, с	8,3	3	−5,3 (−63,9 %)
Минимальная продолжительность нажатия, с	0,2	0,2	0
Средняя периодичность нажатий, с	11,15	14,73	3,58 (+32,1 %)
Среднеквадратическое отклонение периодичности нажатий, с	12,42	15,69	3,27 (+26,3 %)
Максимальное время между нажатиями, с	82,9	124,1	41,2 (+49,7 %)
Минимальное время между нажатиями, с	0,5	0,6	0,1 (+20,0 %)
Средняя частота нажатий, мин ^{−1}	5,41	4,09	−1,32 (−24,4 %)
Суммарная продолжительность нажатий за 1 ч, мин	6,38	3,33	−3,05 (−47,8 %)

С еще большей уверенностью можно сказать, что в данном эксперименте периодичность нажатий имела показательное распределение (см. табл. 2, рис. 7, *б*, *г*).

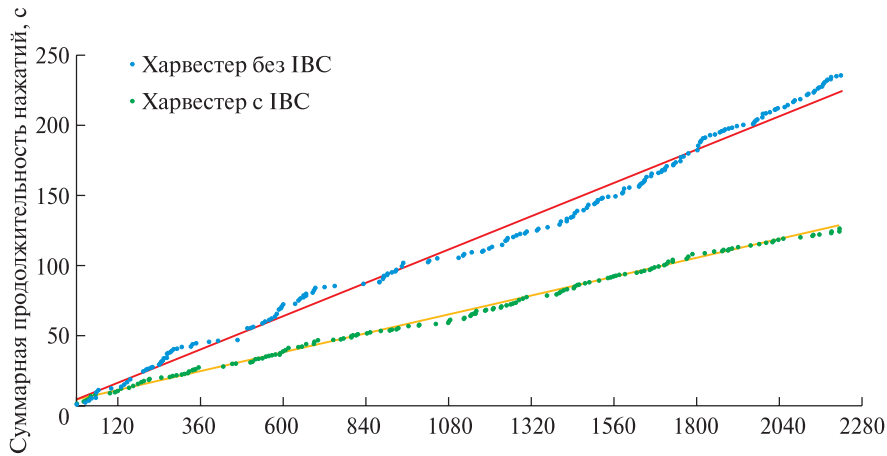


Рис. 6. Динамика суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши управления телескопическим удлинителем харвестера

Fig. 6. Dynamics of the total duration of using the button-key to control the telescopic extension of the harvester

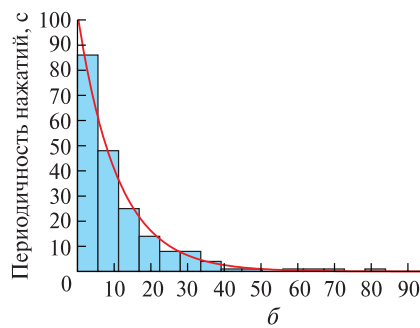
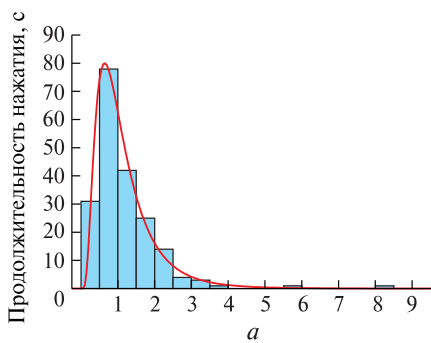
Т а б л и ц а 2

Результаты статистического анализа для харвестера

Statistical Analysis Results for the harvester

Харвестер	Переменная величина, с	Распределение	Параметры			Критерий согласия Пирсона χ^2	Значимая вероятность p -value
			\bar{x}	σ	λ		
Без ИВС	Продолжительность нажатия	Логнормальное	1,18	0,897	–	2,06	0,736
	Периодичность нажатий	Показательное	–	–	0,0897	2,61	0,760
С ИВС	Продолжительность нажатия	Логнормальное	0,81	0,461	–	5,08	0,534
	Периодичность нажатий	Показательное	–	–	0,0679	0,443	0,979

Харвестер без ИВС



Харвестер с ИВС

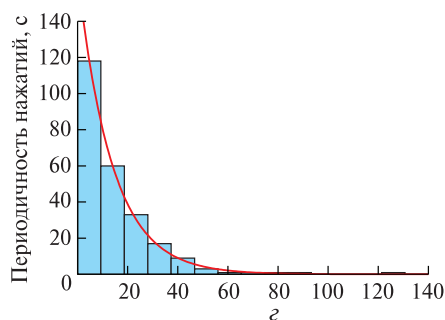
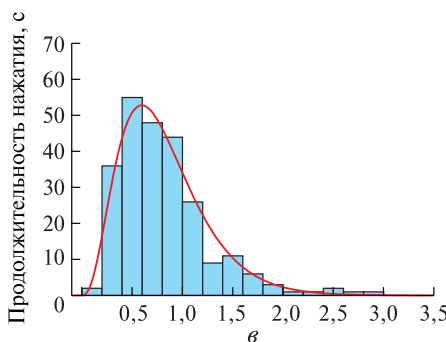


Рис. 7. Результаты статистического анализа для харвестера

Fig. 7. Results of statistical analysis for the harvester

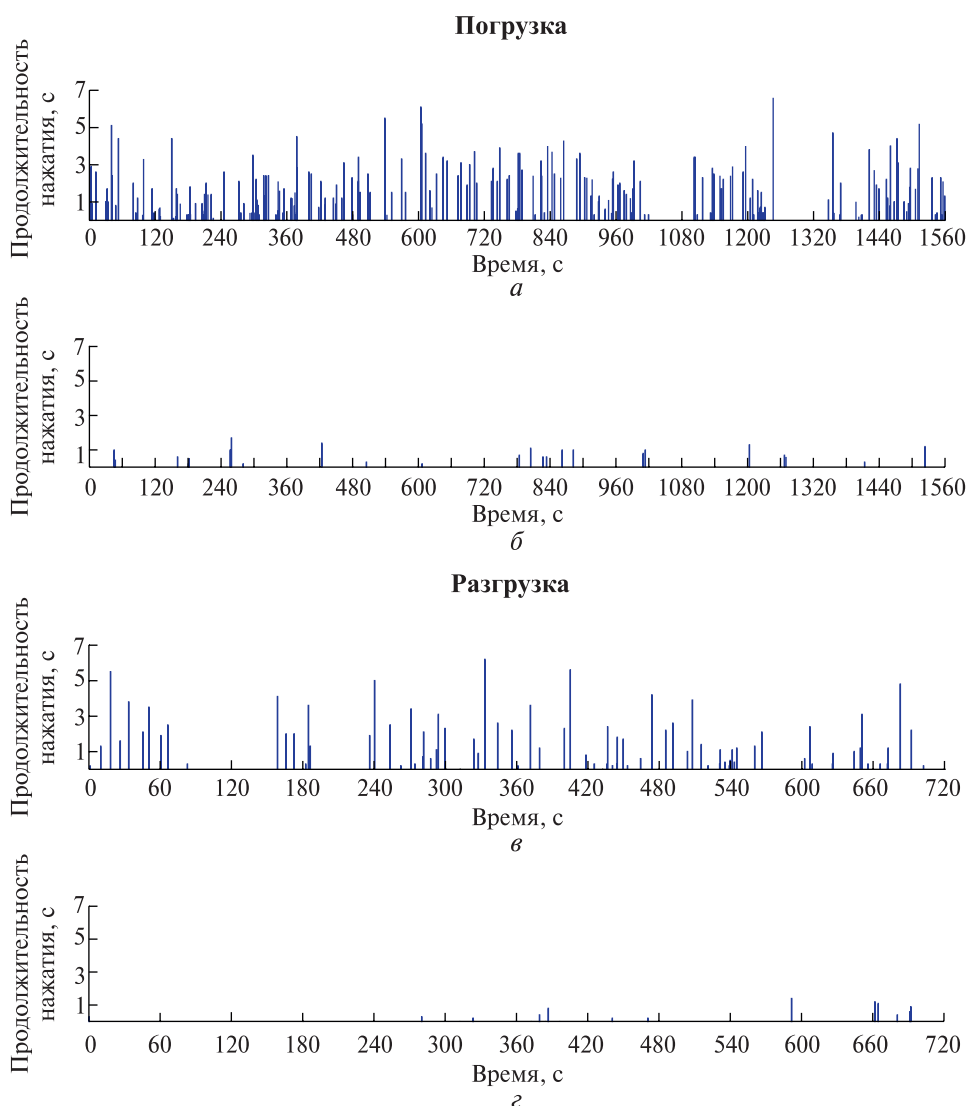


Рис. 8. Распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем: *погрузка*: а — форвардер без ИВС; б — форвардер с ИВС; *разгрузка*: в — форвардер без ИВС; г — форвардер с ИВС

Fig. 8. Distribution of moments and duration of pressing by the operator on the control button of the telescopic extension: *loading*: а — forwarder without IBC; б — forwarder with IBC; *unloading*: в — forwarder without IBC; г — forwarder with IBC

Форвардер. Видеофиксация работы форвардера осуществлялась в течение цикла, включающего в себя три фазы: 1) сбор и погрузка сортированных на делянке; 2) грузовой ход форвардера к месту разгрузки; 3) разгрузка. В отличие от харвестера, рабочий процесс которого более или менее однороден, для форвардера характер использования манипулятора при погрузке и разгрузке несколько отличается, а в течение грузового хода манипулятор вообще не используется. В связи с этим анализ данных был проведен отдельно для фазы погрузки и фазы разгрузки. Время грузового хода было исключено из рассмотрения.

Таким образом, для форвардера с деактивированной системой ИВС к анализу были приняты фрагменты продолжительностью 26 мин 27 с на по-

грузке и 11 мин 47 с на разгрузке. Для форвардера с активированной системой ИВС продолжительность этих фрагментов составила 29 мин 12 с на погрузке и 14 мин 01 с на разгрузке. Отметим, что погрузка и разгрузка в каждом случае относилась к одному и тому же рейсу. Для форвардера с деактивированной системой ИВС на погрузке было зафиксировано 224 нажатия оператором на кнопку управления телескопическим удлинителем, на разгрузке число нажатий составило 83. Для форвардера с активированной системой ИВС число нажатий на погрузке равнялось 32, на разгрузке — только 13.

На рис. 8 показано распределение моментов и продолжительности нажатий оператором на кнопку-клавишу управления телескопическим удлинителем.

Общие результаты для форвардера
Overall results for the forwarder

Показатель	Погрузка			Разгрузка		
	Форвардер без ИВС	Форвардер с ИВС	Разность	Форвардер без ИВС	Форвардер с ИВС	Разность
Средняя продолжительность нажатия, с	1,72	0,91	-0,81 (-47,1%)	1,69	0,62	-1,07 (-63,3%)
Среднеквадратическое отклонение продолжительности нажатия, с	1,30	0,60	-0,70 (-53,8%)	1,47	0,42	-1,05 (-71,4%)
Максимальная продолжительность нажатия, с	6,6	2,8	-3,8 (-57,6%)	6,2	1,4	-4,8 (-77,4%)
Минимальная продолжительность нажатия, с	0,1	0,2	0,1 (+100)	0,2	0,2	0
Средняя периодичность нажатий, с	6,78	53,09	46,31 (+683,0%)	8,52	60,07	51,55 (+605,0%)
Среднеквадратическое отклонение периодичности нажатий, с	9,84	57,43	47,59 (+483,6%)	10,51	72,36	61,85 (+588,5%)
Максимальное время между нажатиями, с	100,9	189,7	88,8 (+88,0%)	75,8	280,1	+204,3 (+269,5%)
Минимальное время между нажатиями, с	0,3	0,8	0,5 (+166,7%)	0,3	0,9	0,6 (+200,0%)
Средняя частота нажатий, мин ⁻¹	8,85	1,10	-7,75 (-87,6%)	7,04	0,93	-6,11 (-86,8%)
Суммарная продолжительность нажатий за 1 час, мин	15,22	0,99	-14,23 (-93,5%)	11,88	0,57	-11,31 (-95,2%)

Графики на рис. 8, а, б соответствуют фазе погрузки и приведены для первых 26 мин наблюдений, в целях сохранения равенства масштабов для сравнения, графики на рис. 8, в, г показывают ситуацию на разгрузке и приведены к 12 мин работы.

В целом общие результаты анализа показывают, что использование системы ИВС для форвардера примерно на порядок сокращает потребные частоту и продолжительность использования органа управления телескопическим удлинителем (табл. 3). Средняя частота использования кнопки на левом джойстике на погрузке сократилась на 87,6 % — с 8,85 до 1,10 нажатий в минуту, на разгрузке зафиксировано примерно такое же сокращение: на 86,8 % — с 7,04 до 0,93 нажатия в минуту. Средняя продолжительность однократного нажатия на погрузке сократилась почти в 2 раза (47,1 %), на разгрузке она сократилась более чем в 2 раза (63,3 %). Суммарная продолжительность всех нажатий, происходящих в течение одного часа, сократилась более чем в 15 раз: на 93,5 % — с 15,22 мин до 0,99 мин на погрузке и на 95,2 % — с 11,88 мин до 0,57 мин на разгрузке. Средний период между нажатиями кнопки увеличился на погрузке почти в 8 раз — с 6,78 с до 53,09 с. На разгрузке зафиксировано увеличение этого показателя примерно в 7 раз — с 8,52 с до 60,07 с.

Огромный (в 15–20 раз) эффект использования системы ИВС на форвардерах подтверждается графически (рис. 9).

Подобрать законы распределения параметров использования органа управления телескопическим удлинителем для форвардера с достаточным уровнем значимости (0,05) удалось не во всех случаях (табл. 4). Например, не удалось подобрать закон распределения продолжительности однократного нажатия на кнопку-клавишу на погрузке в случае с деактивированной системой ИВС, хотя в нашем распоряжении было достаточно большое число наблюдаемых значений — 224. Гистограмму распределения для форвардера можно увидеть на рис. 10, а.

Периодичность использования органа управления телескопическим удлинителем на погрузке без ИВС с достаточно высоким значением достигнутого уровня значимости имеет показательное распределение (табл. 4, рис. 10, б). Для форвардера с активированной ИВС этот параметр так же, как и продолжительность однократного использования кнопки, имеет логнормальное распределение с достигнутыми уровнями значимости 0,252 и 0,495 соответственно (см. табл. 4, рис. 10, в, г).

На разгрузке при использовании форвардера с деактивированной системой ИВС продолжительность однократного воздействия на орган управления имеет показательное распределение, а для периодичности нажатий более всего подходит гамма-распределение, но на пределе заданного уровня значимости (p -value = 0,074).

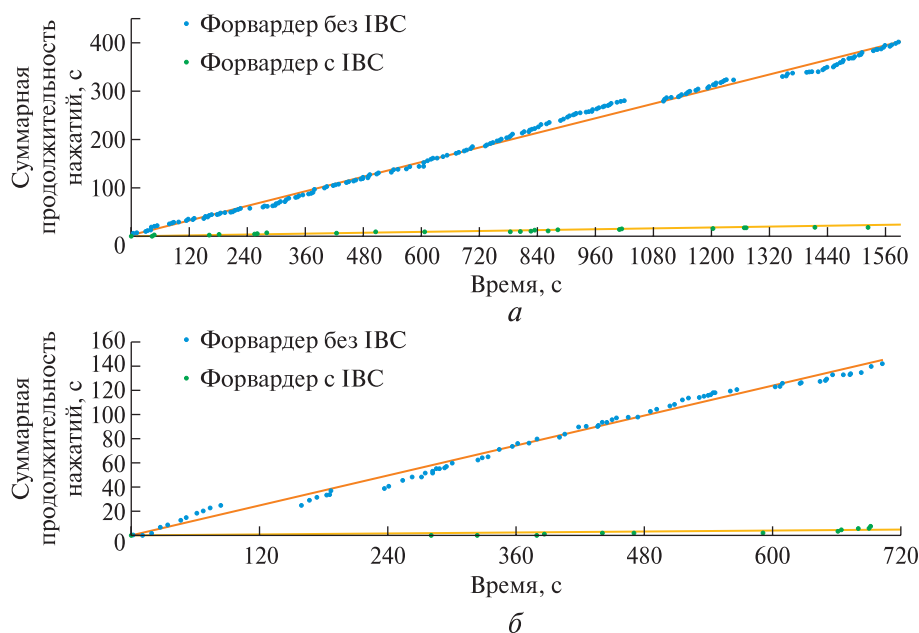


Рис. 9. Динамика суммарной продолжительности использования кнопки-клавиши управления телескопическим удлинителем форвардера: *а* — погрузка; *б* — разгрузка
Fig. 9. Dynamics of the total duration of use of the forwarder telescopic extension control button: *a* — loading; *b* — unloading

Т а б л и ц а 4

Результаты статистического анализа для форвардера

Statistical Analysis Results for the forwarder

Форвардер	Переменная	Распределение	Параметры			Критерий согласия Пирсона χ^2	Значимая вероятность <i>p</i> -value
			\bar{x}	σ	λ		
Погрузка							
Без IBC	Продолжительность нажатия, с	—	1,72	1,30	—	—	—
	Периодичность нажатий, с	Показательное	—	—	0,147	3,41	0,906
С IBC	Продолжительность нажатия, с	Логнормальное	0,91	0,60	—	1,41	0,495
	Периодичность нажатий, с	«—»	53,09	57,43	—	1,31	0,252
Разгрузка							
Без IBC	Продолжительность нажатия, с	Показательное	—	—	0,593	5,16	0,397
	Периодичность нажатий, с	Гамма	$\alpha = 0,657; \beta = 12,96$			3,19	0,074
С IBC	Продолжительность нажатия, с	—	0,62	0,42	—	—	—
	Периодичность нажатий, с	—	8,52	10,51	—	—	—

Для случая форвардера с активированной системой IBC на разгрузке проверку гипотез о распределении параметров провести не удалось в силу ограниченного числа наблюдений (всего 13).

Выводы

Полученные результаты позволяют однозначно утверждать, что использование системы Intelligent Boom Control (IBC) оказывает существенное влияние на параметры рабочего цикла операторов харвестеров и форвардеров John Deere. Причем эффект при использовании системы IBC на харвестере достаточно сильно отлича-

ется от такового на форвардере. Частичная автоматизация управления манипулятором хотя и не позволяет полностью исключить необходимость задействования оператором органа управления телескопическим удлинителем рукоятки, но сводит время его использования к незначительному по продолжительности у форвардера и сокращает примерно в 2 раза у харвестера (рис. 11, *а*). Действительно, средняя частота использования кнопки-клавиши, управляющей выдвиганием телескопического удлинителя рукоятки, сокращается у форвардера примерно в 8 раз (рис. 11, *б*), а общая продолжительность задействования этого органа управления — в 15–20 раз (см. рис. 11, *б*).

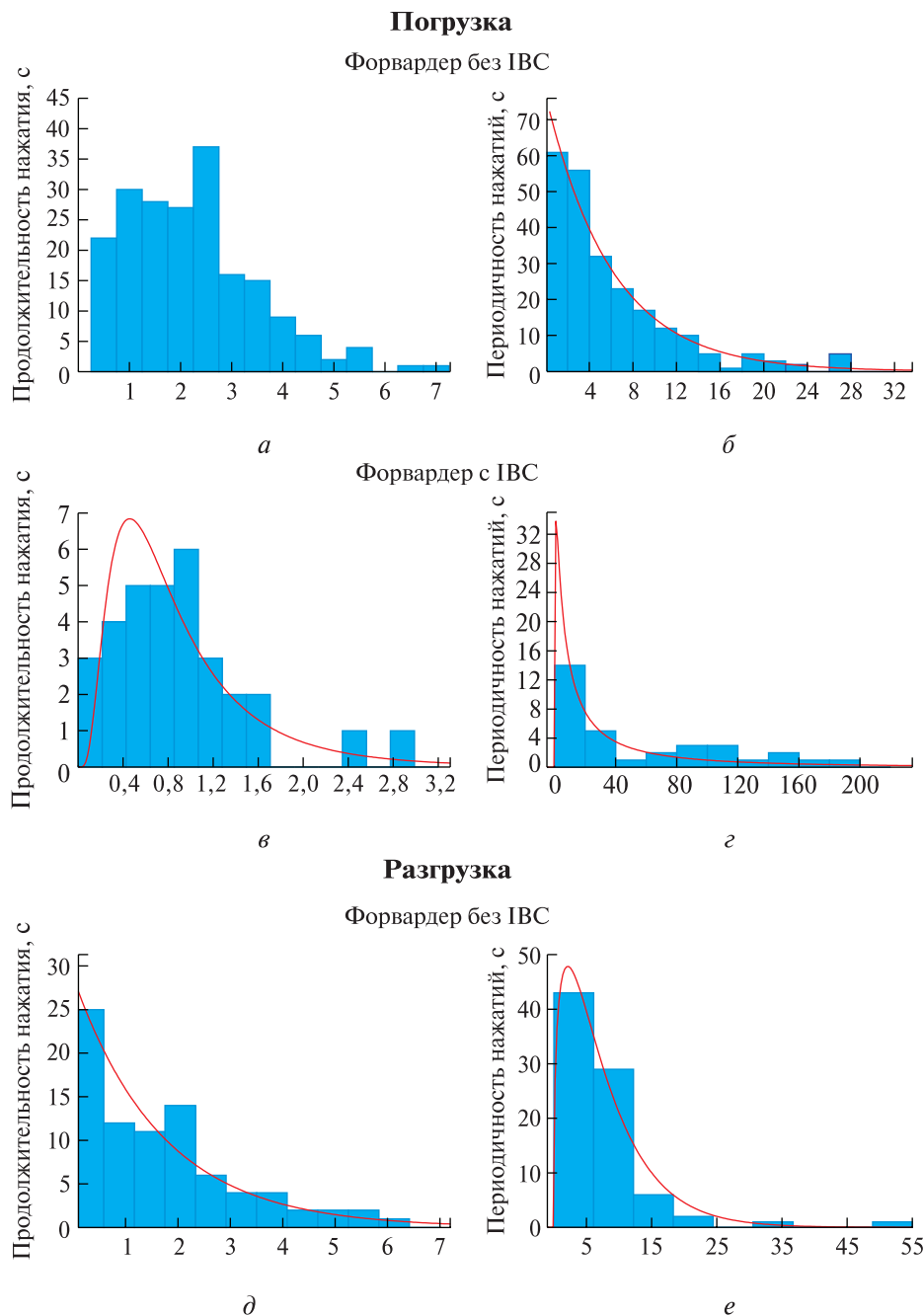


Рис. 10. Результаты статистического анализа для форвардера: *погрузка*: *а* — продолжительность нажатия без ИВС; *б* — периодичность нажатий без ИВС; *в* — продолжительность нажатия с ИВС; *г* — периодичность нажатий с ИВС; *разгрузка*: *д* — продолжительность нажатия без ИВС; *е* — периодичность нажатий без ИВС

Fig. 10. Results of statistical analysis for the forwarder: *loading*: *a* — duration of pressing without IBC; *b* — frequency of pressing without IBC; *v* — duration of depression with IBC; *z* — frequency of pressing with IBC; *unloading*: *d* — duration of depression without IBC; *e* — frequency of pressing without IBC

У харвестера результаты скромнее. Суммарное время использования этой кнопки уменьшается примерно в 2 раза (см. рис. 11, *а*), а средняя частота использования органа управления удлинителем сокращается примерно на четверть (см. рис. 11, *б*). Средняя продолжительность однократного нажатия кнопки-клавиши сокращается примерно на

треть для харвестера, наполовину для форвардера на погрузке и на две трети для форвардера на разгрузке (см. рис. 11, *з*).

Здесь следует отметить, что при отсутствии системы ИВС интенсивность использования удлинителя рукоятки харвестера в целом ниже, чем у форвардера. Частота использования левой

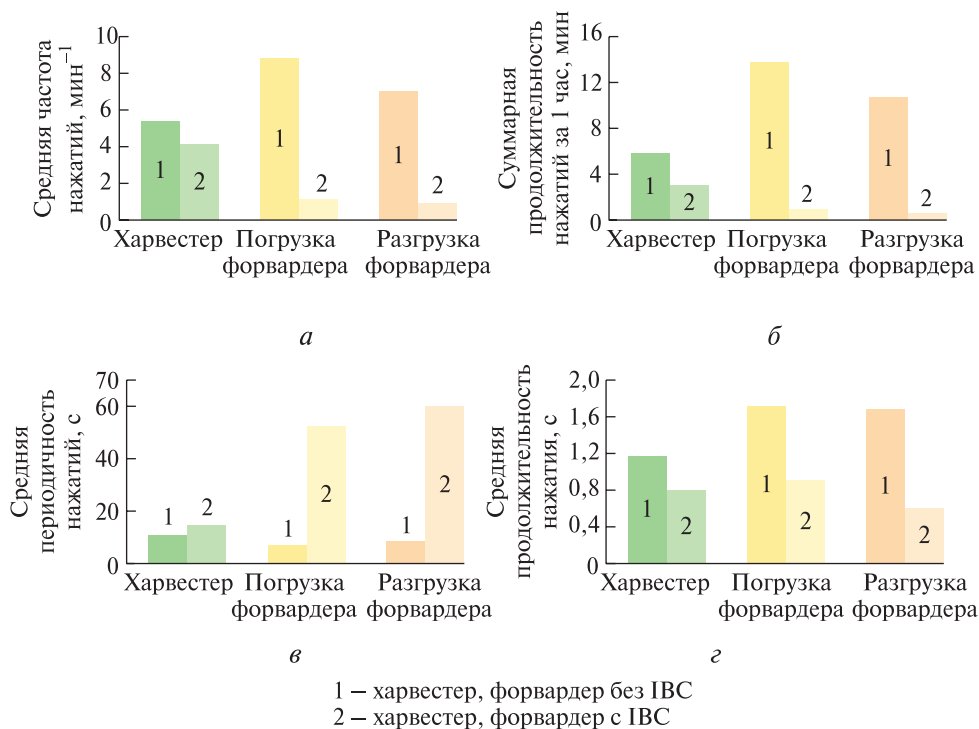


Рис. 11. Общие результаты исследования: *а* — средняя частота нажатий, мин⁻¹; *б* — суммарная продолжительность нажатий за 1 час, мин; *в* — средняя периодичность нажатий, с; *г* — средняя продолжительность нажатия, с

Fig. 11. General results of the study: *a* — average frequency of pressing, min⁻¹; *б* — total duration of pressing for 1 hour, min; *в* — average frequency of pressing, s; *г* — average duration of pressing, s

кнопки-клавиши на харвестере без ИВС в среднем в 1,5 раза меньше, чем на форвардере без ИВС (см. рис. 11, *б*). При этом суммарная продолжительность нажатий изначально меньше более чем в 2 раза (см. рис. 11, *а*). Низкие начальные значения в случае харвестера отчасти объясняют скромное улучшение оцениваемых параметров при внедрении ИВС.

Таким образом, практически полное исключение из использования для форвардера и существенное сокращение продолжительности использования для харвестера одной из степеней свободы органов управления манипулятором высвобождает психофизиологические ресурсы оператора для более эффективного использования оставшегося числа степеней свободы, что совместно с более простой и интуитивной логикой работы органов управления при использовании ИВС способствует повышению производительности, точности и безопасности выполнения технологических процессов сортиментной заготовки древесины. Кроме того, более простой алгоритм работы ослабляет влияние стереотипности выполняемых действий, сокращает утомляемость и снижение внимания, что обычно проявляется к концу смены.

Изложенное выше подтверждает важность применения автоматизации производственных

процессов и правильность принятого ведущими производителями лесозаготовительной техники решения о выборе принципа «Boom-tip control» (BTC) в качестве основного при разработке систем автоматизации управления манипуляторами лесозаготовительных машин на текущем этапе развития технологий.

Выявленные в процессе исследования законы распределения периодичности и времени использования органов управления телескопическим удлинителем рукояти манипуляторов лесозаготовительных машин можно использовать для построения различных моделей при проектировании манипуляторов и анализе перспективных конструкторских решений. Для харвестера законы распределения определены с высоким достигнутым уровнем значимости.

Для форвардера желательно проведение дополнительных наблюдений и измерений в целях уточнения полученных результатов и пополнения недостающих данных. В рамках данного исследования не удалось подобрать закон распределения продолжительности однократного нажатия на кнопку-клавишу управления удлинителем рукояти на погрузке форвардера при деактивированной системе ИВС, несмотря на достаточно большое число наблюдений (см. рис. 10, *а*). Предположительно в данном случае большое влияние

оказывает пространственное распределение сортиментов разного назначения по отношению к оси волока, которое создается при работе харвестера, что приводит к доминированию определенных значений потребной продолжительности работы телескопического удлинителя при сборе каждого из видов продукции (в одном рейсе форвардера обычно происходит сбор одного-двух видов сортиментов для упрощения сортировки при разгрузке) (Manner et al. 2013) [3]. Иными словами, при сборе пиловочника, будут чаще встречаться одни величины, а при сборе, например балансов, — другие.

Не слишком высокие уровни значимости достигнуты при проверке гипотез о законах распределения периодичности нажатий на погрузку с активированной ИВС (логнормальное распределение, p -value = 0,252), а также продолжительности и периодичности нажатий на разгрузку с деактивированной ИВС (показательное распределение и гамма-распределение с p -value 0,0397 и 0,074 соответственно). На цикл разгрузки также оказывают существенное влияние такие факторы, как взаимное расположение штабелей с разными видами продукции, их текущие размеры (высота) и т. д. Влияние этих факторов можно ослабить, собрав данные не по одному, а по нескольким циклам разгрузки.

Дополнительные наблюдения позволят получить результаты с более высокими уровнями значимости. Анализируя гистограммы, уже сейчас можно предположить, что при увеличении объема выборок так же, как и у харвестера, будут получены логнормальный закон распределения для продолжительности однократного нажатия на орган управления удлинителем и показательный закон для периодичности его использования. Для подтверждения этого требуются дополнительные полевые исследования.


Список литературы

- [1] Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 6. С. 132–147.
DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
- [2] Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA // J. of Forest Engineering, 1994, v. 5(2), pp. 43–52.
<https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
- [3] Manner J., Palmroth L., Nordfjell T., Lindroos O. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. // Silva Fennica, 2016, v. 50(3), article 1546. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>
- [4] Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system // Silva Fennica, 2006, v. 40(2), pp. 335–363.
<https://doi.org/10.14214/sf.346>
- [5] Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of

- Loading Forwarders with Logs // Croatian J. of Forest Engineering, 2021, v. 42, pp. 391–403.
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>
- [6] Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation // J. of Forest Science, 2017, v. 63(7), pp. 324–330. <https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS>
- [7] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: «skeleton» part // J. of Forest Engineering, 1998, v. 9(1), pp. 25–30.
- [8] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: optimization of hydraulic cylinder operating mechanisms // J. of Forest Engineering, 2000, v. 11(1), pp. 73–79.
- [9] Fassbender D., Zakharov V., Minav T. Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems // Automation in Construction, 2021, v. 132, article 103964.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964>
- [10] Heikkilä M., Linjama M. Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system // Mechatronics, 2013, v. 23, pp. 452–461.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.03.009>
- [11] Kalmari J., Backman J., Visala A. Coordinated motion of a hydraulic forestry crane and a vehicle using nonlinear model predictive control // Computers and Electronics in Agriculture, 2017, v. 133, pp. 119–127.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.013>
- [12] La Hera P., Ortiz Morales D. Model-based development of control systems for forestry cranes // J. of Control Science and Engineering, 2015, article id 256951.
<https://doi.org/10.1155/2015/256951>
- [13] Ortiz Morales D., Westerberg S., La Hera P.X., Mettin U., Freidovich L., Shiriaev A.S. Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control // J. of Field Robotics, 2014, v. 31(3), pp. 343–363.
<https://doi.org/10.1002/rob.21496>
- [14] Westerberg S. Semi-automating forestry machines: motion planning, system integration, and human-machine interaction // Doctoral thesis. Robotics and control lab, 2014, Umeå University. Umeå: Umeå Universitet, 2014, p. 56.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-89067>
- [15] Hansson A., Servin M. Semi-autonomous shared control of large-scale manipulator arms // Control Engineering Practice, 2010, v. 18(9), pp. 1069–1076.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.05.015>
- [16] John Deere News and Announcements. URL: <https://www.deere.com/en/technology-products/forestry-and-logging-technology/operator-assistance-technology/> (дата обращения 14.02.2022).
- [17] Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder crane's boom tip control system and beginner-level operators // Silva Fennica, 2017, v. 51(2), article 1717.
<https://doi.org/10.14214/sf.1717>
- [18] Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset // Silva Fennica, 2019, v. 53(2), article id 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
- [19] Attebrant M., Winkel J., Mathiassen S.E., Kjellberg A. Shoulder-arm muscle load and performance during control operation in forestry machines: Effects of changing to a new arm rest, lever and boom control system // Applied Ergonomics, 1997, v. 28(2), pp. 85–97.
- [20] Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia // Applied Ergonomics, 2014, v. 45, pp. 318–338.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>

- [21] Østensvik T., Nilsen P., Veiersted K. B. Muscle Activity Patterns in the Neck and Upper Extremities Among Machine Operators in Different Forest Vehicles // *International J. of Forest Engineering*, 2008, v. 19(2), pp. 11–20. DOI: 10.1080/14942119.2008.10702563
- [22] Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work // *International J. of Forest Engineering*, 2002, v. 13(2), pp. 35–47. DOI:10.1080/14942119.2002.10702461
- [23] Gellerstedt S., Synwoldt U. Ergonomic initiatives for machine operators by the Swedish logging industry // *Applied Ergonomics*, 2003, v. 34, pp. 149–156.
- [24] Häggström C., Lindroos O. Human, technology, organization and environment — a human factors perspective on performance in forest harvesting // *International J. of Forest Engineering*, 2016, v. 27(2), pp. 67–78. DOI: 10.1080/14942119.2016.1170495
- [25] Löfgren B., Wikander J. Kinematic control of redundant knuckle booms // *International J. of Forest Engineering*, 2009, v. 20(1), pp. 22–30. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702572>

Сведения об авторах

Соколов Антон Павлович  — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», a_sokolov@psu.karelia.ru

Селиверстов Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», alexander@psu.karelia.ru

Суханов Юрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», yurii_ptz@bk.ru

Сенькин Виктор Александрович — канд. техн. наук, специалист кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», SenkinVictorA@gmail.com

Поступила в редакцию 06.07.2022.

Одобрено после рецензирования 17.08.2022.

Принята к публикации 21.11.2022.

ERGONOMIC EVALUATION OF FORESTRY CRANE PARTIAL AUTOMATION SYSTEM

A.P. Sokolov , **A.A. Seliverstov**, **Yu.V. Sukhanov**, **V.A. Senkin**

Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

a_sokolov@psu.karelia.ru

Harvesters and forwarders are the main part of cut-to-length logging system equipment. Perfection of the hydraulic cranes have a very large impact on the overall operating efficiency of these forest machines. An analysis of impact of the John Deere crane partial automation option «Intelligent Boom Control» (IBC) on the work cycle and workload of forest machines operators is described in this article. Two machines equipped with IBC systems were studied in field conditions. Differences in frequency and duration of telescopic extension boom control activations were identified. It was determined that as a result of automation, one of the degrees of freedom of the crane controls is practically completely excluded from use in the case of forwarder (decrease by about 10 times). A significant reduction in the duration of its use is observed in the case of harvester (decrease by about 2 times). As a result, this saves the psycho-physiological resources of the operator for more efficient use of remaining degrees of freedom, which, coupled with a simpler and more intuitive logic of the controls operation, improves the productivity, accuracy and safety of cut-to-length logging. In addition, a simpler work algorithm reduces the level of stereotyping of the operator's actions, fatigue and loss of attention, which usually come out at the end of the shift.

Keywords: forest machine operators, automation, work cycle, forestry cranes, cut-to-length logging, boom-tip control

Suggested citation: Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A. *O vliyaniy chastichnoy avtomatizatsii upravleniya manipulyatorami na ergonomicheskie pokazateli lesozagotovitel'nykh mashin* [Ergonomic evaluation of forestry crane partial automation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152

References

- [1] Piskunov M.A. *Osobennosti rossiyskogo rynka lesozagotovitel'noy tekhniki* [Features of the harvesting and logging equipment market in Russia]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2020, no. 6, pp. 132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
- [2] Kellogg L.D., Bettinger P. Thinning productivity and cost for mechanized cut-to-length system in the Northwest Pacific coast region of the USA. *J. of Forest Engineering*, 1994, v. 5(2), pp. 43–52. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659>
- [3] Manner J., Palmroth L., Nordfjell T., Lindroos O. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica*, 2016, v. 50(3), article 1546. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>

- [4] Nurminen T., Korpunen H., Uusitalo J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica*, 2006, v. 40(2), pp. 335–363. <https://doi.org/10.14214/sf.346>
- [5] Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2021, v. 42, pp. 391–403. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>
- [6] Strandgard M., Mitchell R., Acuna M. Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(7), pp. 324–330. <https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS>
- [7] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: «skeleton» part. *J. of Forest Engineering*, 1998, v. 9(1), pp. 25–30.
- [8] Gerasimov Y.Y., Siounev V.S. Forest machinery crane compound scheme synthesis: optimization of hydraulic cylinder operating mechanisms. *J. of Forest Engineering*, 2000, v. 11(1), pp. 73–79.
- [9] Fassbender D., Zakharov V., Minav T. Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems. *Automation in Construction*, 2021, v. 132, article 103964. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103964>
- [10] Heikkilä M., Linjama M. Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system. *Mechatronics*, 2013, v. 23, pp. 452–461. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.03.009>
- [11] Kalmari J., Backman J., Visala A. Coordinated motion of a hydraulic forestry crane and a vehicle using nonlinear model predictive control. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, v. 133, pp. 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.013>
- [12] La Hera P., Ortiz Morales D. Model-based development of control systems for forestry cranes. *J. of Control Science and Engineering*, 2015, article id 256951. <https://doi.org/10.1155/2015/256951>
- [13] Ortiz Morales D., Westerberg S., La Hera P.X., Mettin U., Freidovich L., Shiriaev A.S. Increasing the level of automation in the forestry logging process with crane trajectory planning and control. *J. of Field Robotics*, 2014, v. 31(3), pp. 343–363. <https://doi.org/10.1002/rob.21496>
- [14] Westerberg S. Semi-automating forestry machines: motion planning, system integration, and human-machine interaction. Doctoral thesis. Robotics and control lab, 2014, Umeå University. Umeå: Umeå Universitet, 2014, p. 56. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:umu:diva-89067>
- [15] Hansson A., Servin M. Semi-autonomous shared control of large-scale manipulator arms. *Control Engineering Practice*, 2010, v. 18(9), pp. 1069–1076. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.05.015>
- [16] John Deere News and Announcements. Available at: <https://www.deere.com/en/technology-products/forestry-and-logging-technology/operator-assistance-technology/> (accessed 14.02.2022).
- [17] Manner J., Gelin O., Mörk A., Englund M. Forwarder crane's boom tip control system and beginner-level operators. *Silva Fennica*, 2017, v. 51(2), article 1717. <https://doi.org/10.14214/sf.1717>
- [18] Manner J., Mörk A., Englund M. Comparing forwarder boom-control systems based on an automatically recorded follow-up dataset. *Silva Fennica*, 2019, v. 53(2), article id 10161. <https://doi.org/10.14214/sf.10161>
- [19] Attebrant M., Winkel J., Mathiassen S.E., Kjellberg A. Shoulder-arm muscle load and performance during control operation in forestry machines: Effects of changing to a new arm rest, lever and boom control system. *Applied Ergonomics*, 1997, v. 28(2), pp. 85–97.
- [20] Gerasimov Y., Sokolov A. Ergonomic evaluation and comparison of wood harvesting systems in Northwest Russia. *Applied Ergonomics*, 2014, v. 45, pp. 318–338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.018>
- [21] Østensvik T., Nilsen P., Veiersted K. B. Muscle Activity Patterns in the Neck and Upper Extremities Among Machine Operators in Different Forest Vehicles. *International J. of Forest Engineering*, 2008, v. 19(2), pp. 11–20. DOI: 10.1080/14942119.2008.10702563
- [22] Gellerstedt S. Operation of the Single-Grip Harvester: Motor-Sensory and Cognitive Work. *International J. of Forest Engineering*, 2002, v. 13(2), pp. 35–47. DOI:10.1080/14942119.2002.10702461
- [23] Gellerstedt S., Synwoldt U. Ergonomic initiatives for machine operators by the Swedish logging industry. *Applied Ergonomics*, 2003, v. 34, pp. 149–156.
- [24] Häggström C., Lindroos O. Human, technology, organization and environment — a human factors perspective on performance in forest harvesting. *International J. of Forest Engineering*, 2016, v. 27(2), pp. 67–78. DOI: 10.1080/14942119.2016.1170495
- [25] Löfgren B., Wikander J. Kinematic control of redundant knuckle booms. *International J. of Forest Engineering*, 2009, v. 20(1), pp. 22–30. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702572>

Authors' information

Sokolov Anton Pavlovich ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, a_sokolov@psu.karelia.ru

Seliverstov Aleksandr Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, alexander@psu.karelia.ru

Sukhanov Yuriy Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of Department of Technology and Management of Forest Industry Complex, Petrozavodsk State University, yurii_ptz@bk.ru

Sen'kin Viktor Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Specialist of Department of Transport and Technological Machinery and Equipment, Petrozavodsk State University, sva_555@mail.ru

Received 06.07.2022.

Approved after review 17.08.2022.

Accepted for publication 21.11.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
 The authors declare that there is no conflict of interest