

Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация

Ю. В. Суханов¹,
А. А. Селиверстов,
А. П. Соколов,
С. Н. Перский

Петрозаводский государственный университет

АННОТАЦИЯ

Приводится краткое описание алгоритмов операций трелевки форвардером и особенностей их программной реализации.

Ключевые слова: *сортиментная технология, форвардер, имитационная модель, операции трелевки.*

SUMMARY

The short descriptions of algorithm and simulation model of forwarder are presented in article.

Keywords: *cut-to-length logging, forwarder, simulation model, skidding operations.*

При решении проблем выбора техники для проведения промышленных лесозаготовок или рубок ухода за лесом необходимо учитывать множество разнообразных факторов. Помочь оптимально выбрать систему машин и технологию может проведение имитационных экспериментов с компьютерными моделями, учитывающими особенности машин и природно-производственных условий.

На сегодняшний день существует много научных работ, посвященных моделированию работы лесозаготовительных машин. В Петрозаводском государственном университете были проведены значительные работы по разработке моделей лесных машин [1, 2]. Модели создавались с помощью методов имитационного моделирования, ГИС-технологий и СУБД. За критерии качества принимались производительность машины, снижение повреждаемости древостоя, повышение доступности вырубаемых деревьев, повышение качества проведения рубки и снижение веса машины. Были проведены работы по созданию моделей процесса заготовки древесины комплексом машин с использованием теории очередей [3]. Методикой моделирования операций лесных машин, оснащенных манипулятором, занимались в СПбГЛТУ им. С. М. Кирова (ранее СПбГЛТА) [4]. Проблемами расчета производительности операций лесосечных работ занимались в Сибирском федеральном университете (СФУ) [5].

¹ Авторы – соответственно преподаватель кафедры ТОЛК, доценты кафедры тяговых машин
©. Суханов Ю. В., Селиверстов А. А., Соколов А. П., Перский С. Н., 2012

На лесоинженерном факультете в сотрудничестве с НИИ леса Финляндии (METLA), в соответствии с Программой стратегического развития ПетрГУ, проводились исследования работы лесозаготовительных машин в рамках проектов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013», «Технико-экономическая и эколого-социальная оценка перспективности заготовки древесной биомассы для нужд местной энергетики с использованием логистического подхода и ГИС-технологий», «Новые трансграничные решения в области интенсификации ведения лесного хозяйства и повышения степени использования топливной древесины в энергетике» (KARELIA ENPI CBC PROGRAMME 2007–2013).

Имитационная модель позволяет проводить компьютерные эксперименты над форвардером при выполнении следующих видов работ:

- форвардер на трелевке сортиментов;
- форвардер на трелевке порубочных остатков;
- форвардер на работах по трелевке пакетов порубочных остатков.

Исходными данными для модели трелевки сортиментов являются результаты моделирования работы харвестера или бригады вальщиков. Исходными данными для моделирования трелевки порубочных остатков являются результаты работы харвестера. Исходными данными для моделирования трелевки пакетов являются результаты работы пакетирующей машины (типа John Deere 1490D). Для моделирования считываются данные с координатами, объемами сортиментов, куч порубочных остатков и пакетов соответственно.

На основании модели форвардера, выбранной пользователем для моделирования, из таблицы с характеристиками считываются основные данные по машине, в том числе колесная формула, вес, габариты, клиренс, ширина колес, вылет манипулятора и его момент, скорость движения форвардера, грузоподъемность и т. д.

Форвардер движется по линии технологического коридора от одной технологической стоянки до другой. Положение форвардера определяется двумя координатами его центра и углом направления движения. Форвардер останавливается у сформированных пачек сортиментов (куч порубочных остатков или пакетов), собирает их с помощью манипулятора и укладывает на грузовую платформу (при погрузке может быть выполнена предварительная подсортировка для сортиментов). При погрузке проверяется вес набранного вoза, и если он равен паспортной грузоподъемности машины, погрузка останавливается. Для порубочных остатков ограничением служит объем вoза, который может быть помещен на грузовую платформу. Форвардер трелюет собранные сортименты (порубочные остатки или пакеты) на погрузочную площадку и там разгружается. Для сортиментов учитывается время сортировки сортиментов.

После разгрузки форвардер возвращается к месту последней технологической остановки и продолжает сбор и погрузку пачек сортиментов (порубочных остатков, пакетов), пока не будет собрано все, что назначено в работу. При движении форвардера по технологическому коридору учитывается количество проходов по одному и тому же месту для того, чтобы в дальнейшем оценить, какая система машин требует меньше проходов, оставляет меньшую колею и уплотнение почвогрунта. Расчет колееобразования помогает определить границы применения системы машин по проходимости.

Для моделирования работы форвардера создается цикл (рис. 1), в котором выполняются последовательно три подпрограммы: подпрограмма определения координат следующей технологической стоянки, подпрограмма движения форвардера до места намеченной стоянки и подпрограмма сбора и погрузки пачек сортиментов. При загрузке, равной паспортной грузоподъемности, вызывается подпрограмма трелевки сортиментов на погрузочную площадку для разгрузки.

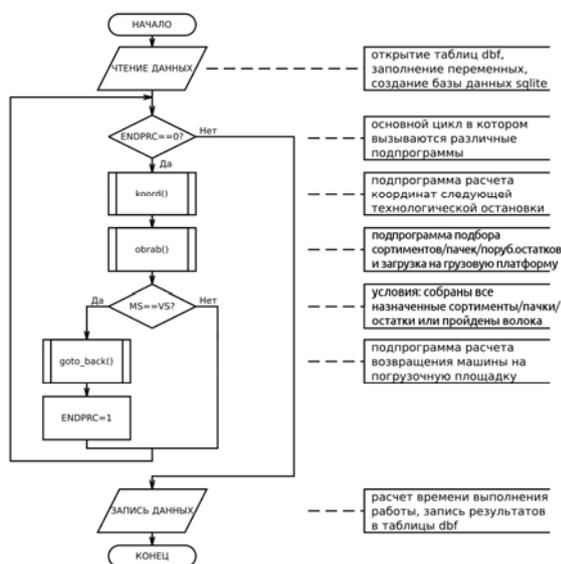


Рис. 1. Схема основного цикла алгоритма моделирования работы форвардера

Координаты технологической стоянки форвардера определяются исходя из положения пачек сортиментов (куч порубочных остатков, пакетов) и вылета манипулятора форвардера.

В цикле с шагом 0,25 м по линии технологического коридора рассчитываются координаты колонны манипулятора форвардера. На каждом шаге определяется, сколько объектов может быть собрано. Если на доразживание оставляются деревья, то необходимо проверить доступность объектов для сбора манипулятором. Выход из цикла может произойти, если выполнится хотя бы одно из двух условий:

– на предыдущем шаге цикла общее количество больше, чем на текущем;

– на текущем шаге цикла недоступен хотя бы один объект, который был доступен на предыдущем.

При выходе из цикла координатами следующей технологической стоянки назначаются координаты «лучшего шага» i' . Расстояние, которое проедет форвардер от старой стоянки до новой стоянки (в метрах), равно $i' \cdot 0,25$.

Проверка на возможность повреждений деревьев во время движения форвардера производится как при движении машины по волоку во время сбора, так и при движении с набранным возом к погрузочной площадке и при движении от погрузочной площадки к месту, где сбор сортиментов (порубочных остатков, пакетов) был приостановлен. Повреждения стволов деревьев из-за крена машины и корней деревьев записываются в специальную таблицу. В дальнейшем, складывая повреждения от всех машин в цепочке, находится количество и определяется серьезность повреждения деревьев, оставляемых на доразживание.

При определении плотности грунта в колее после прохода форвардера учитывается вес воза на грузовой платформе. Если система машин состоит из харвестера и форвардера или если по данному месту форвардер проезжает не в первый раз, то расчет ведется с учетом предыдущих проходов.

При движении в сложных дорожных условиях скорость лесной машины снижается. Скорость форвардера в текущих дорожных условиях

$$V^T = \frac{G \cdot f}{(G + G_p) \cdot f^T} \cdot V,$$

где G – вес форвардера, Н;
 G_p – текущий вес воза на грузовой платформе, Н;
 f – коэффициент сопротивления движению в хороших условиях;
 f^T – коэффициент сопротивления движению в текущих условиях;
 V – скорость форвардера из технических характеристик, м/с.

Зная скорость движения форвардера, можно определить время, затрачиваемое на передвижение между технологическими стоянками, и время на транспортировку сортиментов на погрузочную площадку.

Моделирование сбора сортиментов производится в следующей последовательности. Определяются все объекты для сбора, находящиеся в зоне действия манипулятора. Сортируются записи во временной таблице так, чтобы ближние объекты были в начале таблицы, с учетом того, с какой стороны волока объекты находятся. В цикле считываются координаты объекта, объем, количество. Проверяется возможность наведения манипулятора с учетом оставленных на доразживание деревьев.

Проверяем возможность взятия пачки по загрузке машины:

$$M_{vt} + V_p \cdot \rho_d < CC \cdot 1000,$$

где M_{vt} – масса воза на грузовой платформе, тещущая, кг;
 V_p – объем пачки, м³;
 ρ_d – плотность, зависит от типа объекта и породы, кг/м³;
 CC – паспортная грузоподъемность форвардера, т.

Если неравенство не выполняется, то для варианта сбора сортиментов рассчитываем часть пачки, которую можем взять, – в цикле $j=1..Z$ производим проверку по данному неравенству, только вместо объема пачки берем сумму объемов части сортиментов:

$$M_{vt} + \sum_{k=1}^j (V_{sor_k}) \cdot \rho_d < CC \cdot 1000.$$

При наборе воза массой, равной паспортной грузоподъемности, отмечаем переменную-флажок, которая будет требоваться при дальнейших расчетах.

Производим проверку возможности взятия объекта по моменту манипулятора:

$$V_p \cdot \rho_d \cdot g \cdot \sqrt{(X_m - X_p)^2 + (Y_m - Y_p)^2} < M_{man},$$

где $g = 9.81$ – ускорение свободного падения, м/с²;
 X_m, Y_m – координаты колонны манипулятора форвардера, м;
 X_p, Y_p – координаты пачки, м;
 M_{man} – момент манипулятора форвардера, Н·м.

Для варианта сбора сортиментов, если неравенство не выполняется, то в цикле $j=1..Z$ рассчитываем, за сколько раз (J_m) возможно погрузить всю пачку, вместо объема всей пачки берем сумму объемов части сортиментов.

При погрузке манипулятором форвардера возможно нанесение повреждений оставляемому на доращивание древостою как самим манипулятором, так и перемещаемой пачкой (для варианта сбора сортиментов и пачек порубочных остатков). Каждый тип повреждения помечается в отдельной колонке таблицы повреждений деревьев.

Если объект взят форвардером, то он помечается в таблице как собранный. Масса воза на грузовой платформе форвардера увеличивается на массу собранного объекта.

Время, затрачиваемое на сбор объекта:

$$t_s = J_m \cdot \left(\frac{\sqrt{(X_m - X_p)^2 + (Y_m - Y_p)^2}}{L_m} \cdot (t_{xx} + t_s) + t_{zr} \right),$$

где L_m – вылет манипулятора форвардера, м;
 t_{xx} – время перемещения пустого захвата на вылет L_m , с;
 t_{xx} – время перемещения захвата на вылет L_m , с;
 t_{zr} – время, требуемое на захват и разжим рычагов, с.

Если форвардер набрал воз массой, равной паспортной грузоподъемности, или максимальный объем порубочных остатков, то вызывается подпрограмма движения форвардера, где в качестве места назначения выступает погрузочная площадка. После разгрузки вызывается подпрограмма определения координат технологической стоянки, которая в свою очередь рассчитывает место следующей стоянки.

Время, которое машина затратит на передвижение между стоянками, зависит от скорости движения и расстояния:

$$t_{об} = L / V^T,$$

где $t_{об}$ – время на передвижение, с;
 L – расстояние между стоянками, м;
 V^T – скорость передвижения форвардера, м/с.

Создается таблица, в которую записывается время, потраченное форвардером на выполнение технологических операций. Количество строк в таблице соответствует количеству технологических стоянок. В таблицу заносятся номер стоянки, время, затраченное на передвижение до стоянки, скорость передвижения до стоянки и суммарное время на сбор пачек сортиментов с этой стоянки.

Время разгрузки воза на погрузочной площадке:

$$t_r = \frac{M_{vt}}{M_{ps}} \cdot \left(\frac{L_{raz}}{L_m} \cdot t_{xx} + \frac{L_{raz}}{L_m} \cdot t_s + t_{zr} \right),$$

где L_{raz} – вылет манипулятора при разгрузке, м;
 M_{vt} – масса воза, который набрали, кг;
 M_{ps} – масса объектов, перемещаемая в захвате за один раз (принимаем равной среднему значению от масс, перемещаемых при погрузке), кг.

Моделирование вышерассмотренных операций работы форвардера реализовано на языке C++ (компилятор MinGW, инструментарий Qt 4.5). Полученная программа позволяет работать в двух режимах: без визуального представления процесса моделирования и в графическом режиме (рис. 2).

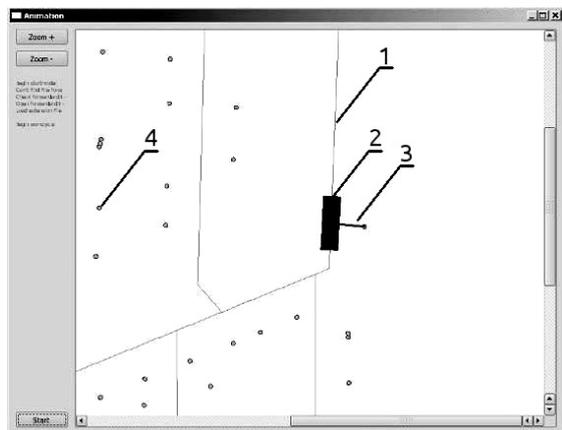


Рис. 2. Графический режим моделирования работы модели форвардера на трелевке сортиментов:
1 – ось технологического коридора; 2 – форвардер;
3 – манипулятор; 4 – центр пачки сортиментов

В результате работы модели заполняются результирующие таблицы. В зависимости от задач моделирования рассчитываются объемы стрелеванных сортиментов, отходов или пакетов, а также время работы. Для форвардера производится проверка возможности передвижения машины по делянке. Если глубина колеи больше клиренса машины, то моделирование останавливается и делается вывод о невозможности работы машины.

Результаты моделирования используются для расчета часовой производительности работы форвардера, а также себестоимости проведения работ по трелевке лесоматериалов.

Пример: часовая производительность форвардера на сборе пачек порубочных остатков

$$Пч = \frac{3600 \cdot \sum_{j=1}^{Np} V_{pj}}{\sum_{k=1}^{Nst} t_{двк} + \sum_{j=1}^{Np} (t_{sp})_j + \sum_{m=1}^{Nraz} (t_r + t_{дсп})_m}$$

где N_p – количество собранных пачек порубочных остатков, шт.;
 V_{pj} – объем биомассы в j -м пакете, m^3 ;
 N_{st} – количество технологических стоянок;
 $t_{двк}$ – время, затраченное на движение к k -й технологической стоянке, с;
 t_{sp} – время, затраченное на сбор j -й пачки, с;
 N_{raz} – число поездок на погрузочную площадку;
 t_r – время разгрузки, с;
 $t_{дпр}$ – время, затраченное на переезд к погрузочной площадке, с.

Затраты на эксплуатацию лесозаготовительной техники делятся на условно-постоянные и переменные. Условно-постоянные затраты рассчитываются за определенный промежуток времени, как правило, это календарный год, и они не зависят от продолжительности эксплуатации машины. Переменные затраты изменяются пропорционально времени использования машины.

К условно-постоянным затратам относятся: процент с капитала и амортизация, все виды страховок, административные и общехозяйственные расходы и компенсации, выплачиваемые оператору машины.

Переменные (прямые) затраты включают в себя расходы на труд, затраты на топливо и горюче-смазочные материалы, затраты на ремонт и техническое обслуживание лесозаготовительного трактора.

Подробное описание метода расчета затрат на час работы машины можно найти в источниках [6, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов Ю. Ю. Лесосечные машины для рубок ухода: компьютерная система принятия решений / Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сютнев. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. – 236 с.
2. Герасимов Ю. Ю. Геоинформационные системы: теория и применение в лесном комплексе / Ю. Ю. Герасимов [и др.]. – Йоэнсуу: Изд-во университета Йоэнсуу, 2000. – 201 с.
3. Морозов Е. В., Шегельман И. Р., Будник П. В. Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов // Перспективы науки, 2011. – № 7(22). – С. 183-186.
4. Чайка О.Р. Моделирование работы манипуляторной машины на не сплошных рубках в естественных лесах // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса; Ленинградская лесотехническая академия им. С. М. Кирова. – Л. – 1991. – С. 56-60
5. Ширнин Ю. А. Моделирование процессов заготовки сортированных деревьев и хлыстов: монография. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 204 с.
6. Промежуточное пользование лесом на Северо-Западе России / Ананьев В. А., Асикайнен, А., Вяльккю Э., Герасимов Ю. Ю., Демин К. К., Сиканен Л., Сютнев В. С., Тюкина О. Н., Хлюстов В. К., Ширнин Ю. А. – Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2005. – 150 с.
7. Расчет эксплуатационных затрат лесосечных машин / Герасимов Ю. Ю., Сибиряков К. Н., Мошков С. Л., Вяльккю Э., Карвинен С. – Йоэнсуу: НИИ леса Финляндии, 2009. – 46 с.