

УДК 630*36

С. Е. Арико, аспирант (БГТУ)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ХАРВЕСТЕРНОЙ МАШИНЫ 4К4

В статье представлена разработанная математическая модель работы харвестера 4К4, позволяющая оценивать динамику взаимодействия лесной машины с предметом труда. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые подтверждают адекватность получаемых результатов.

In article the developed mathematical model of work harvester 4K4 allowing is submitted to estimate dynamics of interaction of the wood machine with a subject of work. Results theoretical and experimental researches which confirm adequacy of received results are resulted.

Введение. Энергетический парк лесозаготовительных и лесохозяйственных предприятий Республики Беларусь долгие годы состоял из гусеничных тракторов российского производства и агрегатных машин, созданных на их базе. Это металлоемкие, низкоэнергонасыщенные, малопроизводительные, экологически трудносоместимые и низкого уровня эргономики технические средства были созданы для заготовки древесины по хлыстовой технологии.

Опыт применения машин для сортиментной заготовки древесины в Швеции, Финляндии, Германии и других странах показал, что при прочих разных условиях они обеспечивают минимальные затраты на заготовку одного метра кубического древесины, а также исключает необходимость создания нижних складов для раскряжевки древесины. Данная технология, называемая скандинавской, подразумевает применение специализированной лесозаготовительной техники в составе валочно-сучкорезно-раскряжевочной (харвестера) и погрузочно-транспортной (форвардера) машин, представленных соответственно на рис. 1 и 2. При использовании данного лесозаготовительного комплекса харвестер формирует пачки сортиментов и создает благоприятные условия для повышения производительности работы форвардера путем укладки заготовленной древесины вдоль трелевочного волока и ее одновременной подсортировки.



Рис. 1. Валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина МЛХ-414 «Беларус»



Рис. 2. Погрузочно-транспортная машина МЛ-131 «Беларус»

В настоящее время подобная технология получает все большее распространение в Республике Беларусь и отдельных регионах Российской Федерации (в Карелии по сортиментной технологии заготавливается 60% леса).

На фоне совершенствования технологического и технического уровня заготовки и восстановления леса отмечается бурное развитие научно-технического прогресса в этих областях. Вследствие чего для средне- и крупномасштабных лесозаготовок созданы колесные машины для заготовки сортиментов и транспортировки древесины в полупогруженном и погруженном состоянии.

Математическая модель работы харвестерной машины 4к4. Большинство зарубежных лесозаготовительных фирм трудоемкие первые технологические операции всех видов рубок леса выполняют механизированными способами. При этом эффект достигается не только за счет экономии труда, но и путем минимизации применения технических средств. В связи с этим большой спрос у потребителя имеют многофункциональные харвестерные колесные машины, выпускаемые фирмами «Ponsse», «Valmet», «Timberjack», «Caterpillar» и др.

Аналогичная лесозаготовительная техника выпускается отечественными предприятиями ОАО «Амкодор» и РУП «Минский тракторный завод». Основным конкурентным преимуществом

лесных машин, произведенных в республике, является их невысокая стоимость и малые эксплуатационные затраты. Для выбора оптимальных параметров устанавливаемого технологического оборудования на собственное шасси возникает необходимость оценки динамической составляющей взаимодействия многооперационной лесозаготовительной машины с предметом труда в различных природно-производственных условиях.

Исследование динамических свойств лесных машин является необходимым и одним из наиболее важных этапов проектирования новых образцов и модификации существующих. Сложность динамического анализа заключается в невысокой точности аналитического исследования даже простых механических систем, поскольку динамика, как правило, описывается системами дифференциальных или дифференциально-алгебраических уравнений, в общем случае нелинейных, решение которых в явном виде получить невозможно. С другой стороны, само составление уравнений движения механических систем с большим числом степеней свободы является сложной задачей. Это связано с ростом сложности выражений для кинематических величин, определяющих положение, скорости и ускорения элементов, входящих в систему, при увеличении длины кинематических цепей.

При выполнении операций технологического цикла возникают активные силы, действующие на рабочие органы машин (харвестерную головку, гидроманипулятор, колесо трактора и т. д.). В общем случае рабочие нагрузки зависят от кинематических параметров рабочих органов, ускорения и времени. В ряде случаев воздействие активных сил на рабочие органы является кратковременным (удар падающего дерева). Рабочие процессы такого рода называют ударными или импульсными.

Особого рассмотрения требуют силы сопротивления, возникающие в кинематических парах, а также силы тяжести отдельных звеньев, центры масс которых перемещаются в процессе движения. Это относится к дереву при перемещении его в захватно-срезающем устройстве, а также стреле и рукояти манипулятора при выполнении движений технологического цикла.

Изучение динамики любой машины начинается с выбора динамических моделей ее функциональных частей. Причем в динамической модели функциональной части машины следует учитывать те их свойства, которые являются существенными для достижения поставленной задачи.

При изучении динамических процессов необходимо схематизировать реальный объект,

т. е. выбрать его идеализированную физическую модель. Следует при этом сказать, что при рассмотрении динамики лесных машин достаточно иметь достоверную динамическую модель, что позволяет решать вопросы их эксплуатационной надежности.

При построении динамических моделей для решения инженерных задач физические системы упрощаются и учитываются только главные факторы, имеющие решающее значение при изучении рассматриваемых процессов. Допустимость принимаемых идеализаций обычно проверяется сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными.

Схематизация реальных систем может быть двух видов: динамические модели с сосредоточенными параметрами (дискретные модели); динамические модели с распределенными параметрами (непрерывные модели).

В первом случае масса объекта рассматривается как сосредоточенная в точке масса, сила, упругая связь представляется в виде безынерционного соединения. Во втором случае допускается идеализированное представление реальных систем в виде упругоинерционных сплошных сред. Однако при исследовании лесного оборудования достаточно правомерными оказываются динамические модели первого вида. Процессы в механической системе, соответствующей динамической модели с сосредоточенными параметрами, могут быть описаны системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Исследованиями и опытом эксплуатации лесных машин установлено, что динамические усилия, которые испытывают гидроманипуляторы, приемные устройства и другое оборудование лесных машин, при определенных условиях очень велики. Величина и характер их изменения зависят от многих факторов (массы и местоположения звеньев технологического оборудования и др.) и могут быть снижены при оптимизации параметров системы. Одним из факторов, существенно влияющих на ударные силы, которые развиваются при валке деревьев, является подвижность опор приемных устройств, при этом возможно снижение ударных сил на 30–40%. Значительное влияние на процесс взаимодействия рабочих органов машин с деревом оказывают динамические параметры машины, технологического оборудования, деревьев и параметры узлов их связи [1].

Среди задач динамического анализа машин и оборудования следует выделить задачу динамического анализа с учетом колебаний их звеньев, их упругой податливости и диссипативных свойств.

Для технологического оборудования, дерева и самой машины характерны вынужденные

колебания, вызываемые периодическими и случайными внешними силами. При этом наиболее интенсивные вынужденные колебания происходят при совпадении частоты внешних сил с одной из частот собственных колебаний системы. Это так называемые резонансные колебания, которые опасны с точки зрения как долговечности, так и прочности звеньев механизмов и оборудования. Не менее опасны и автоколебания, возникновение которых обусловлено динамической неустойчивостью некоторых рабочих режимов и не зависит от внешних периодических сил.

Третьим характерным видом колебаний являются переходные процессы, возникающие при неустановившемся движении, например, при пуске и торможении источника движения рабочих органов, переходе с одного режима движения на другой [1].

При рассмотрении напряженно-деформированного состояния элементов конструкции лесозаготовительных и других машин обнаружено, что наибольшее распространение получил метод конечных элементов. Бычек А. Н. [2] рассматривал конструкцию клещевого захвата в виде комбинированной конечноэлементной модели, в которой навесное устройство, места крепления гидроцилиндров, крестовина, клыки захвата моделировались стержневыми элементами, а корпус захвата – пластинчатыми.

Исследование динамики взаимодействия лесной машины с предметом труда в процессе валки посвящена работа профессора А. В. Жукова [3]. Наиболее полное представление технологического процесса машинной валки деревьев в виде математической модели рассмотрено автором при описании динамики работы машины в положении, когда манипулятор располагается перпендикулярно продольной оси машины, а валка производится на максимальном вылете данного технологического оборудования в сторону, противоположную расположению лесной машины. Автором не учитываются упругодемпфирующие свойства гидравлической жидкости, находящейся в полости гидроцилиндров, которые оказывают значительное влияние на нагруженности элементов гидропривода и лесной машины в целом. Также для оценки динамики работы данной лесозаготовительной машины в другом положении технологического оборудования требуются дополнительные затраты времени на определение приведенных моментов инерции, значений параметров упругих и демпфирующих свойств.

Рассматривая математические модели работы машин валочного типа следует отметить тот факт, что должное внимание не уделяется рассмотрению возмущающих усилий, возника-

ющих от ветровой нагрузки и взаимодействия сучьев падающего и стоящих деревьев, что характерно при проведении рубок промежуточного пользования. Теоретическое исследование данных возмущений приведены в работах Жукова А. В. [4] и Асмоловского М. К. [5].

С учетом преимуществ и недостатков вышеизложенных методик оценки динамической нагруженности лесозаготовительных машин разработана математическая модель взаимодействия валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (ВСПМ) с предметом труда (рис. 3). В ней шины представлены в виде упругодемпфирующих элементов, расположенных перпендикулярно опорной поверхности. Горизонтально-вертикальный шарнир – в виде двух угловых обобщенных координат с упругодемпфирующими элементами, связывающими полурамы энергетического и технологического модулей. Металлоконструкция полурам принимается жесткой с соответствующими сосредоточенными массами M_1 и M_2 . Колебания базового шасси рассматриваются как малые. Математическая модель стрелы и рукояти манипулятора представляется в виде двойного маятника с вязкоупругими шарнирами и колеблющейся точкой крепления стрелы [6].

Металлоконструкция гидроманипулятора также рассматривается в виде элемента, обладающего упругой податливостью, при этом принимаются во внимание упругодемпфирующие свойства гидропривода. Масса технологического оборудования представляется в виде отдельных дискретных масс, приведенных к характерным точкам [7].

Математическая модель описывает процесс взаимодействия лесной машины с предметом труда при различном положении технологического оборудования, что позволяет учитывать специфику конструкции лесного шасси, заключающегося в шарнирно-сочлененном соединении полурам, а также брать в расчет распределение масс машины и технологического оборудования на передний и задний мост в процессе работы.

Модель (рис. 3) представляет базовое шасси в виде двух, а манипулятор в виде трех сосредоточенных масс. Связь между элементами, входящими в динамическую модель, описывается восьмью степенями свободы, которые позволяют рассмотреть процесс работы машины с учетом вертикальных, поперечных и продольных колебаний. Особенностью модели является представление работы харвестера в пространстве, что способствует рассмотрению динамической нагруженности харвестерной машины при расположении технологического оборудования в любой точке рабочей зоны.

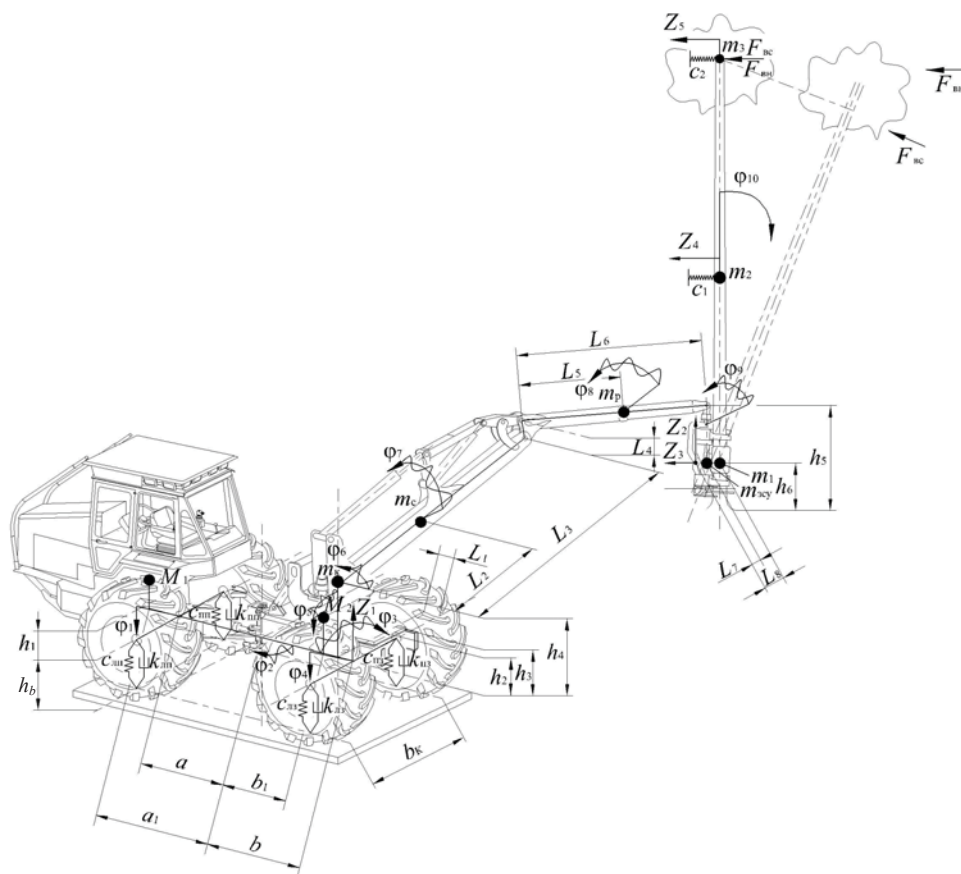


Рис. 3. Математическая модель работы харвестера

Система дифференциальных уравнений, описывающая процесс работы харвестера, решается совместно с системой уравнения, описывающей процесс управляемого падения дерева с учетом действующих внешних сил и решается методом Рунге – Кутты с постоянным шагом интегрирования.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения: M_1 , M_2 , m_k , m_c , m_p , m_{3cy} – масса энергетического, технологического модулей, колонны, стрелы, рукояти манипулятора, харвестерной головки; a , b – расстояние от оси колес энергетического и технологического модулей до вертикально-горизонтального шарнира; a_1 , b_1 – расстояние от центра масс энергетического и технологического модулей до вертикально-горизонтального шарнира; h_b – высота от опорной поверхности до оси колес; h_1 , h_2 , h_4 , h_3 – высоты расположения масс M_1 , M_2 , m_k и месторасположение шарнира наклона колонны относительно горизонтальной оси; L_1 – расстояние от оси технологического модуля до шарнира наклона колонны; L_3 , L_4 , L_6 , L_2 , L_5 – длина стрелы, кронштейна, рукояти, а также месторасположение соответственно центров масс стрелы и рукояти; L_7 , L_8 – расстояние от оси до центров тяжести m_{3cy} и m_1 ; h_5 , h_6 – расстояние от земли до места крепления ротатора

и оси вращения захватно-срезающего устройства (ЗСУ); обобщенные координаты Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 учитывают линейные перемещения ВСПМ, оси вращения ЗСУ, дискретных масс m_2 и m_3 ; φ_1 – φ_{10} учитывают угловые перемещения базового шасси, манипуляторного оборудования, углы валки дерева относительно продольной оси лесной машины и вертикального его положения. Модель учитывает влияние ветровой нагрузки ($F_{вн}$) и усилия взаимодействия между сучьями падающего и стоящих деревьев ($F_{вс}$).

Для реализации математической модели и обработки полученных экспериментальных данных использованы пакеты программ: AutoCAD 2007, MathCAD 14, Catman и Excel.

В результате реализации математической модели построены зависимости перераспределения нагрузки между колесами технологического и энергетического модулей (рис. 4). Для сопоставления теоретических и экспериментальных данных рассматривался процесс поворота манипулятора из крайнего левого в крайнее правое положение при вылете стрелы в 5 м с закрепленным в харвестерной головке сортиментом массой 585 кг.

В процессе исследования установлено, что нагрузка под колесами борта, в сторону которого поворачивается манипулятор, изменяется

незначительно. Изменение нагрузки под колесами противоположного борта характеризуется резким ее уменьшением, а с увеличением угла поворота в одну из сторон изменение реакций под колесами соответствующего борта имеют различный характер. На технологическом модуле реакция (вылет 5 м, масса сортирента 585 кг) возрастает в 1,13–1,14 раза, а на энергетическом модуле в 2,35–2,61 раза.

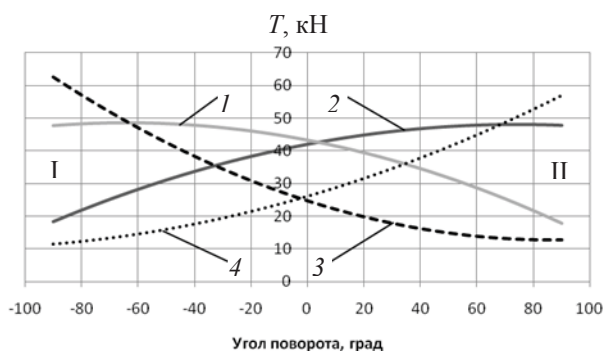


Рис. 4. Распределение нагрузки между колесами харвестера МЛХ-414 в зависимости от угла поворота манипулятора: 1, 2 – левое и правое колеса технологического модуля; 3, 4 – левое и правое колеса энергетического модуля; I – область, соответствующая повороту манипулятора в левую сторону; II – область, соответствующая повороту манипулятора в правую сторону

При рассмотрении устойчивости шарнирно-сочлененных машин выделяют следующие признаки потери устойчивости [8]: отрыв от плоскости склона одного из колес; необратимая потеря устойчивости и опрокидывание одной из секций трактора на ограничительные опоры другой секции (случай отключения блокировки вертикально-горизонтального шарнира); необратимая потеря устойчивости всей машины и ее опрокидывание.

При проведении экспериментальных исследований (рис. 5) установлено, что харвестерная машины МЛХ-414 при отключенном горизонтально-вертикальном шарнире обладает невысокой устойчивостью. В связи с этим выполнение операций технологического цикла, за исключением переездов с одного места стоянки в другое, возможно только при заблокированном шарнире.

Исследование поперечной устойчивости проводилось путем увеличения вылета манипулятора, расположенного перпендикулярно продольной оси машины, с закрепленным в ЗСУ сортирентом массой 585 кг. Исследованиями установлено, что отрыв колеса технологического модуля происходит при вылете 7,8 м, а поте-

ря устойчивости лесной машины наступает при вылете 8,3 м.



Рис. 5. Экспериментальные исследования устойчивости харвестера МЛХ-414

Закключение. Экспериментальная проверка разработанной методики математического моделирования динамических процессов, возникающих в процессе выполнения технологических операций, подтвердила адекватность полученных результатов и возможность дальнейшей оценки параметров харвестера и технологического оборудования в зависимости от таксационных параметров древостоя.

Литература

1. Жуков, А. В. Теория лесных машин: учеб. пособие для студентов вузов / А. В. Жуков. – Минск: БГТУ, 2001.
2. Бычек, А. Н. Обоснование параметров бесчokerной трелевочной машины на базе трактора МТЗ-82: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Бычек. – Минск, 2000.
3. Жуков, А. В. Динамика харвестера / А. В. Жуков // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревооб. пром-сть. – 2003. – Вып. XI.
4. Жуков, А. В. Проектирование лесопромышленного оборудования: учеб. для вузов / А. В. Жуков. – Минск: Выш. шк., 1990.
5. Асмоловский, М. К. Выбор и обоснование динамических параметров узкозахватной валочной машины: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. К. Асмоловский. – Минск, 1993.
6. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: учеб. для вузов / Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1991.
7. Багаутдинов, И. Н. Совершенствование опорно-поворотного устройства лесозаготовительных машин манипуляторного типа / автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Н. Багаутдинов – Йошкар-Ола, 2002.
8. Будевич, Е. А. Нагруженность валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин в процессе очистки деревьев от сучьев / автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Будевич. – Петрозаводск, 2006

Поступила 01.04.2010