

ДЕТАЛИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УДК 621.87:658.512.011.56

*И. В. ЛЕСКОВЕЦ, кандидат технических наук, Белорусско-Российский университет, г. Могилев***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВЕСКИ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ**

Обоснована необходимость применения специализированного программного обеспечения для проведения уточненных расчетов параметров гусеничного движителя. Определены задачи, требующие решения при разработке программного обеспечения. Изложены допущения и ограничения, используемые при создании имитационной модели гусеничного движителя. Представлена динамическая модель гусеничного движителя, на основе которой разработана математическая модель для определения характеристик поведения подвески движителя и машины в целом. Описана методика составления математической и алгоритмической моделей, предназначенных для реализации на ЭВМ в виде программного обеспечения. Представлен метод определения геометрических координат подвески движителя в имитационной модели. Описаны варианты задач, решение которых возможно с использованием прилагаемой методики. Указаны преимущества использования предлагаемых имитационных моделей. Определены основные направления развития предлагаемого метода.

В настоящее время системы автоматизированного проектирования находят все более широкое применение в промышленности. Производство техники с целью снижения ее себестоимости вызывает необходимость внедрения САД-, САЕ- и САМ-технологий. На стадии проектирования технологии САД и САМ требуют объединения или взаимного дополнения. При проектировании сложных машин, какими являются и гусеничные машины, необходимы взаимная увязка проектных решений, подтверждение решений при выборе вариантов конструкций, определении параметров конструкций машин с помощью теоретических расчетов, натурных и имитационных исследований. В последнее время на первый план в данной области выходит имитационное моделирование, основанное на математических моделях, что позволяет значительно удешевить работы, проводимые на стадии проектирования.

Развитие программного обеспечения, основанного на использовании метода конечных элементов, позволяет на стадии проектирования техники получить конструкторские решения и варианты исполнения механизмов и деталей, практически идеально соответствующие требуемым характеристикам. Такие результаты достижимы только в том случае, когда используется достоверная информация о качественном и количественном нагружении изделий в условиях эксплуатации. К сожалению, данную информацию можно получить на основании натурных испытаний образца либо прототипа, что существенно увеличивает стоимость проектных работ. Другим вариантом может быть имитационное моделирование техники на основании математических моделей.

Моделирование гусеничных машин в настоящее время производится на основании самых общих рекомендаций, разработанных еще в 60–80-е годы прошлого века [1–3]. В целом применение этих рекомендаций позволяет получить наиболее

общие параметры машины, соответствующие предъявляемым требованиям. Однако математический и программный аппарат того времени не позволял получить значительное количество информации, характеризующей как качественные процессы, происходящие во время работы движителя, так и их количественные величины. Безусловно, имитационные модели гусеничных машин могут значительно повысить эффективность проектирования техники, однако для их применения требуется разработка методов моделирования машины: задание системы ограничений, адекватно отвечающих условиям работы техники; установление видов нагружения отдельных элементов, узлов и деталей машины; разработка методов, описывающих взаимодействие узлов машины, и, наконец, создание математической модели и реализация ее на ЭВМ в виде программного обеспечения, адаптированного к запросам конструктора, не требующее высокой квалификации и позволяющее получить максимально возможное количество качественных и количественных характеристик работы различных элементов машины, требующих оптимизации, а также имеющее возможность отображения процессов на экране в виде движения машины, что позволит выявить ошибки в задании начальных параметров на стадии ввода исходных данных.

В таком программном обеспечении наряду с решением системы уравнений, составленных на основании динамической модели движителя, представленной на рисунке 1, требуется решить ряд задач по заданию ограничений движения механизмов движителя, таких как опорные и поддерживающие подвески. Необходимо определить возможные виды движения этих механизмов в зависимости от их конструкции, разработать способы задания и расчета параметров и характеристик самих механизмов, учесть варианты взаимодействия с соседними элементами машины. Одной из

таких задач является определение геометрических координат колес машины при имитации ее движения по опорной поверхности.

В данном случае рассматривается плоская модель машины. Поддерживающие колеса имеют возможность перемещения относительно рамы машины в направлении оси ординат локальной системы координат, соответствующей декартовой, с центром в центре тяжести машины. Опорная поверхность недеформируема, микропрофиль отсутствует. Рассматривается подвеска опорных и под-

держивающих колес свечного типа, угловые перемещения механизма подвески относительно рамы машины отсутствуют. Трак представляет собой твердое тело, с центром тяжести в геометрическом центре; на концах трака присутствуют шарниры, обеспечивающие взаимодействие соседних траков через соединяющий палец. Подвеска опорных и поддерживающих колес жестко крепится к раме машины, которая представляет собой недеформируемый остов.

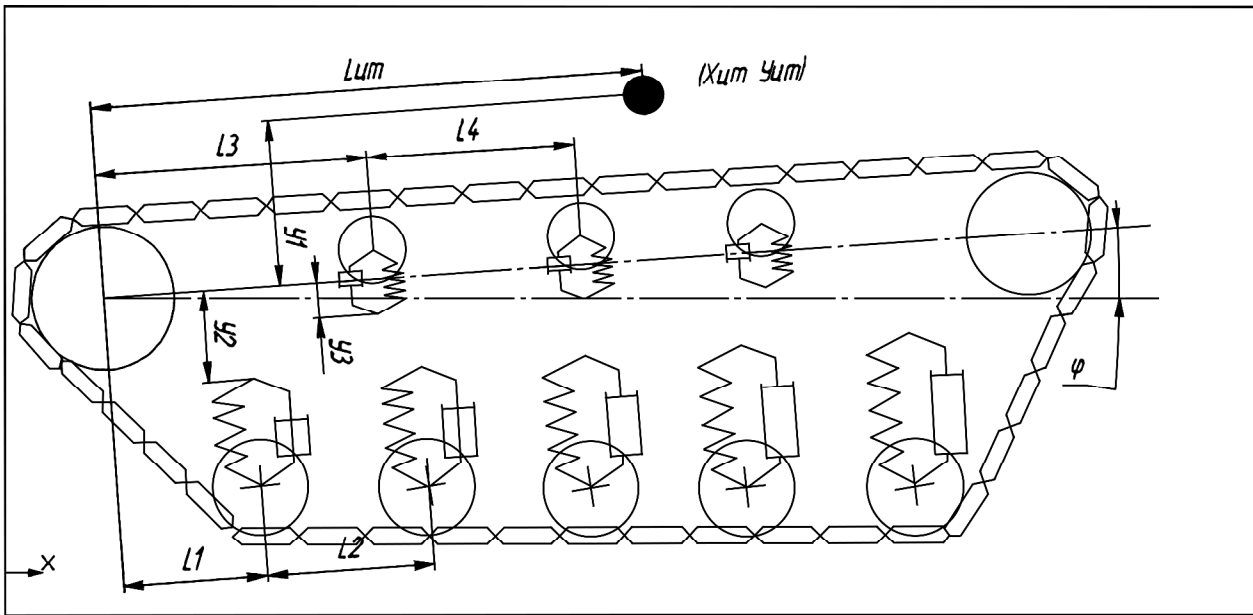


Рисунок 1 – Общая динамическая модель гусеничного движителя:

$L_{цт}$ – расстояние от центра тяжести до центра ведущего колеса; $L1$ – расстояние от центра ведущего колеса до центра опорного колеса; $L2$ – расстояние между центрами опорных колес; $L3$ – расстояние от центра ведущего колеса до центра поддерживающего колеса; $Y1$ – расстояние от центра тяжести до центра ведущего колеса; $Y2$ – расстояние от центра ведущего колеса до точки крепления опорной подвески; $Y3$ – расстояние от центра тяжести до точки крепления верхней подвески, ϕ – угол стабилизации

Как видно из рисунка 1, опорные колеса могут совершать движение в вертикальном направлении в локальной системе координат. Машина может совершать движения: вертикальное в глобальной декартовой системе координат вдоль оси ординат и вращательное в плоскости XOY вокруг центра тяжести машины либо вокруг одной из точек крепления крайних колес к раме машины, при полном выборе хода соответствующих подвесок. Таким образом, колеса совершают сложное движение, что требует подробного математического и алгоритмического описания в связи с необходимостью учета динамических нагрузок, которые возникают при взаимодействии траков с опорной поверхностью.

Динамическая модель подвески данного типа представлена на рисунке 2. Как видно из рисунка, определение геометрических координат колеса в данном случае необходимо для выяснения, с каким именно траком данное колесо взаимодействует в общей системе уравнений, имеющих переменную структуру [4]. Следует заметить, что в описываемом случае угол α равен углу стабилиза-

ции машины ϕ , т. к. подвеска не имеет возможности углового перемещения относительно рамы машины. В случае применения подвесок другого типа необходимо составление моделей перемещения подвесок по соответствующим законам. Приведение параметров подвесок к подвеске свечного типа, на наш взгляд, в данном случае недопустимо.

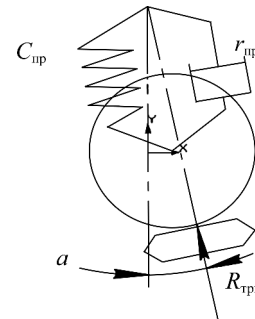


Рисунок 2 – Подвеска опорных колес

Математическая модель:

$$\frac{\partial \dot{Y}_k}{\partial t} = (R_{трк} - C_{пр} \Delta L_{пр} + r_{пр} \dot{y}_k - m_k g) / m_k, \quad (1)$$

где $R_{трк} = C_k \Delta L - r_k \dot{y}_k$ – усилия от взаимодействия колеса и трака; $C_{пр}$ – коэффициент жесткости

пружины; $\Delta L_{пр}$ – относительное перемещение пружины; $r_{пр}$ – коэффициент диссипативных сил пружины; $\dot{Y}_к$ – вертикальная скорость колеса в системе вертикальных координат машины; $m_к$ – масса колеса; $C_к$ – приведенный коэффициент жесткости колеса и трака; ΔL – величина, определяющая взаимное перекрытие при контакте колеса и трака; $r_к$ – коэффициент диссипативных сил между колесом и траком; $\dot{y}_к$ – скорость колеса по оси ординат в локальной системе координат.

Как видно из выражения (1), одним из основных параметров, определяющих ускорение колеса, является величина сжатия пружины ΔL . При определении усилия необходимо учитывать ограничения, накладываемые механизмом подвески. Ограничения определяются на основании рисунка 3. В данном случае величина F_{NL} определяет начальное сжатие пружины при ограничении хода механизмом подвески; в случае равенства текущей длины пружины F_{TL} и величины F_{NL} усилие пружины равно нулю, т. к. ход подвески ограничен, и усилие пружины является внутренним усилием в механизме подвески. В остальных случаях усилие пружины определяется как произведение $C_{пр}\Delta L$, где $\Delta L = F_{LS} - F_{TL}$ и F_{TL} – текущая длина пружины. В случае, когда пружина сжата полностью, т. е. ограничен максимальный ход подвески, необходимо определять усилие сжатия пружины с учетом упора механизма подвески в "отбойник". В этом случае коэффициент жесткости пружины $C_{пр}$ необходимо определять с учетом коэффициента жесткости рамы машины. Данный способ позволяет более точно установить максимальные усилия, возникающие при полном сжатии пружины подвески.

Решая в совокупности систему уравнений, в частности методом Эйлера, получим скорости и перемещения колес подвески в локальных координатах.

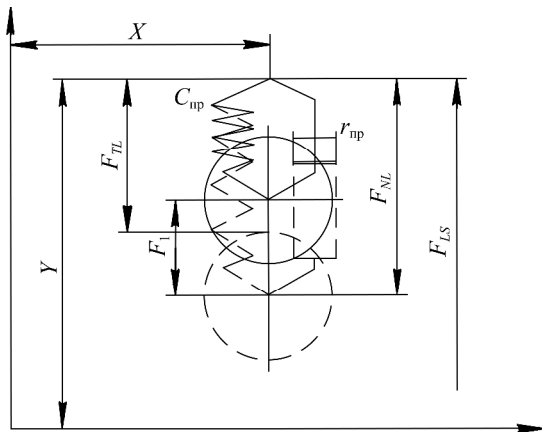


Рисунок 3 – Параметры подвески:

X – расстояние от начала отсчета до точки крепления на раме машины по оси абсцисс; Y – расстояние от начала отсчета до точки крепления на раме машины по оси ординат; F_{TL} – текущая длина пружины; F_{NL} – длина пружины при ограничении хода механизмом подвески; F_{LS} – длина пружины в свободном состоянии; F_1 – ход подвески; $C_{пр}$ – коэффициент жесткости пружины, $r_{пр}$ – коэффициент демпфирования подвески

В связи с необходимостью имитации движения машины на экране и приведения параметров к единой глобальной системе координат, при определении реальных координат положения колес следует выполнить пересчет координат с учетом расположения центра тяжести машины по оси ординат и угла стабилизации. В первую очередь необходимо определить координаты точек крепления подвески на раме машины:

$$X_{тк}^i = (X_{вк} + L1) \cos(\varphi);$$

$$Y_{тк}^i = Y_{вк} - Y2 \cdot \cos(\varphi) + L1 \cdot \sin(\varphi),$$

где $X_{тк}^i, Y_{тк}^i$ – координаты точек крепления подвесок к раме машины в глобальной системе координат.

Далее определяем текущую длину пружины соответствующей подвески в локальной системе координат соответствующей подвески:

$$\Delta L = Y_{тк}^i - \frac{y_к^i}{\cos(\varphi)},$$

где $y_к^i$ – координата колеса в локальной системе координат каждой подвески.

Затем определяем текущие значения координат колес в глобальной системе координат машины:

$$Y_к^i = (Y_{тк}^i - \Delta L) / \cos(\varphi);$$

$$X_к^i = X_{вк} + L1 \cdot i \cos(\varphi),$$

где i – номер текущего колеса.

Для машины в целом уравнение, определяющее ускорение машины по оси ординат, учитывая, что модель плоская, будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \dot{Y}}{\partial t} = \left(\sum F_{пр} \cos(\varphi) - \frac{mg}{2} \right) / m,$$

где $\sum F_{пр}$ – сумма сил от всех опорных подвесок.

Значение $F_{пр}$ определяется по зависимости

$$F_{пр} = C_{пр} (L_{п1} - L_t),$$

$C_{пр}$ – коэффициент жесткости пружины; $L_{п1}$ – начальная длина пружины, определяемая конструкцией механизма подвески; L_t – текущая длина пружины.

Уравнение, определяющее угол поворота машины, имеет вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left(\sum (F_{пр} (L_i - L_1 - L_{ст})) \right) / J,$$

где $L_i = L_1 i$; i – номер соответствующего колеса.

В данном случае уравнение определяет угол поворота машины относительно центра тяжести, поэтому масса машины не учитывается.

В процессе расчетов могут возникнуть случаи, когда машина опирается на заднее либо переднее опорное колесо. В случае, когда машина опирается на зад-

нее опорное колесо, уравнение, определяющее угол поворота машины, приобретает следующий вид:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \left(\sum (F_{пр} (L_i - L_1 - L_{ст}) \cos(\phi)) - \frac{mgL_{ст}}{2} \right) / J ,$$

где i изменяется от двух до максимального количества опорных колес.

Предлагаемый метод позволяет определить текущие геометрические координаты элементов опорной и поддерживающей подвесок машины в локальных и глобальной системах декартовых координат, что необходимо для обеспечения точности проводимых расчетов при определении параметров и характеристик взаимодействия колес машины с траками, которые в свою очередь взаимодействуют с опорной поверхностью.

Математическая модель, реализованная с помощью специальных алгоритмов в виде программного обеспечения, дает возможность проводить расчеты параметров и имитацию движения машины. Использование данного программного обеспечения позволяет получить уточненные результаты условий работы машины на различных стадиях рабочих процессов. Можно рассматривать работу машины в целом и ее элементов при агрегатировании с различным рабочим оборудованием. Пользователю предоставляется возможность анализа самых разнообразных задач, решение которых требуется при проектировании, совершенствовании и модернизации гусеничных машин, таких, например, как задачи оптимизации взаимных размеров траков, опорных колес и расстояния между опорными колесами с целью минимизации давлений на опорную поверхность. Возможно проведение аналитических исследований в статике и динамике, т. е. при движении машины, заглоблении и выглоблении рабочих органов, анализе процессов, происходящих в стадии разработки материала; в настоящее время эти задачи решаются при использовании усредненных данных. Для быстроходных машин можно проводить анализ нагружения гусеничного обвода при движении по микро- и макропрофилям опорной поверхности.

Получено 24.07.2007

I. V. Leskovez. The determination of suspension characteristics in the caterpillar mover simulator.

In the article the necessity of special software applications for carrying out the adjusted caterpillar mover data analysis is proved. The tasks fulfilled in software development are defined. Assumptions and boundary conditions used during the creation of caterpillar mover simulator are stated. The dynamic model of caterpillar mover is submitted. On the basis of the dynamic model the mathematical model for characterization of mover suspension and machine implementations is developed. The technique of making mathematical and algorithm models meant for computer software realization is described. The method for determination of mover suspension geometric coordinates in simulation model is submitted. Variants of tasks the fulfillment of which is possible using the above-mentioned technique are described. The advantages of the introduced simulation models application are stated. The basic lines of the introduced method development are determined.

В настоящее время практически отсутствует возможность проведения исследований поведения отдельных частей гусеничного обвода: тяговой, холостой и верхней ветви при движении с большими скоростями. Не установлено влияние изменения угла стабилизации машины и координат центра тяжести по оси ординат во время движения машины на момент сопротивления движению, возникающий на ведущем колесе, и, как следствие, нагрузки, возникающие в трансмиссии, учитываются только с использованием коэффициентов динамичности, что не позволяет проводить оптимизацию на многокритериальной основе. При использовании подвесок с амортизаторами, что является необходимым при увеличении средних скоростей движения машин и повышении удельной мощности, затруднительным является определение режимов нагружения и, как следствие, условий работы амортизатора, что может привести к ошибкам в определении температурных параметров и выходу из строя амортизаторов в процессе эксплуатации машин. Следует отметить, что в данном случае причины возникновения ошибок на стадии проектирования, приводящих к браку на производстве, выделить очень сложно.

Таким образом, использование программного обеспечения, разработанного на основании предлагаемых методик, может существенно снизить затраты на проектирование, уменьшить количество ошибок при проектировании.

Список литературы

- 1 **Носов, А. Н.** Расчет и конструирование гусеничных машин / А. Н. Носов [и др.] – Л. : Машиностроение, 1972. – 560 с.
- 2 **Гуськов, В. В.** Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет : учеб. пособие для вузов по спец. "Автомобили и тракторы" / В. В. Гуськов [и др.] ; под общ. ред. В. В. Гуськова. – Мн. : Выш. школа, 1981. – 383 с.
- 3 **Барский, И. Б.** Конструирование и расчет тракторов / И. Б. Барский. – М. : Машиностроение, 1968. – 376 с.
- 4 **Лесковец, И. В.** Математическая модель гусеничного движителя СДМ / И. В. Лесковец // Вестник Могилевского гос. техн. ун-та. – Могилев, 2003. – С. 83–87.