

А.А. ЗУЕВ, ст. преподаватель НТУ "ХПИ",
Д.А. ГАПОН, ст. преподаватель НТУ "ХПИ"

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГУСЕНИЧНОГО ДВИЖИТЕЛЯ В ТРЕНАЖЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Стаття присвячена розробці математичних основ моделювання в реальному масштабі часу руху гусеничної техніки по довільній поверхні, з урахуванням фізичних і механічних властивостей поверхні. Наведено основні формули і співвідношення, а також алгоритм функціонування моделі руху з високим ступенем реалістичності, яку можливо реалізувати на сучасних обчислювальних засобах.

Статья посвящена разработке математических основ моделирования в реальном масштабе времени движения гусеничной техники по произвольной поверхности, с учетом физических и механических свойств поверхности. Приведены основные формулы и соотношения, а также алгоритм функционирования модели движения с высокой степенью реалистичности, которую возможно реализовать на современных вычислительных средствах.

This article is devoted to the development of mathematical foundations of modeling real-time traffic tracked vehicles on any surface, taking into account the physical and mechanical properties of the surface. The basic formulas and relations, as well as the functioning algorithm of the model with a high degree of realism that can be implemented in today's computing hardware are given.

Постановка проблеми. Высокая производительность современных вычислительных средств позволяет обрабатывать достаточно сложные математические алгоритмы в реальном времени. Одним из прикладных направлений такого моделирования можно считать создание различных тренажерных средств и комплексов, в основе которых лежит виртуальная модель технических средств и их взаимодействия с окружающим миром. Применение тренажеров боевой техники позволяет не только многократно снизить стоимость обучения, но и выработать навыки, связанные с ситуациями которые крайне сложно или невозможно воссоздать в реальном мире. При этом достоверность моделирования играет ключевую роль в качестве обучения.

При моделировании гусеничной военной техники одной из наиболее важных и сложных задач, является описание реалистичного движения техники по различным поверхностям с учетом их геометрических и механических свойств. Большую часть времени в боевой обстановке движение осуществляется по различным естественным грунтам, однако необходимо также учитывать случай искусственных поверхностей, таких как асфальтовое или бетонное покрытие.

Анализ литературы. Достаточно полное математическое описание гусеничного движителя и его взаимодействия с поверхностью дано в [1]. Однако данное описание предназначено для выполнения инженерных расчетов и

не может быть применено для моделирования движения с помощью вычислительной техники в реальном времени.

Модель, приведенная в [2], имеет наименьшую вычислительную сложность. Так, для гусеничного движителя уравнение моментов приложенных к ведущим колесам, ленивцам и опорным каткам при движении по горизонтальной поверхности имеет следующий вид:

$$M_k = (F_k - F_n)r_k + M_d + M_c + M_j, \quad (1)$$

где F_k - реакция почвы направленная по движению машины, F_n - лобовое сопротивление, возникающее вследствие прессования почвы, M_d - момент всех сил трения в движителе, M_c - момент сопротивления перекатыванию, M_j - момент касательных сил инерции деталей гусениц, редуцированных к ведущему колесу.

При высокой удельной мощности, характерной для современной гусеничной военной техники, без значительного ущерба для достоверности модели можно пренебречь значениями M_d и M_j . Такая модель, также, позволяет провести инженерный расчет, однако не пригодна для моделирования движения по ландшафту сложной формы, содержащему различные типы грунтов и поверхностей.

Физическая модель, рассмотренная в [3] основана на модели Ф.А. Опейко:

$$M(x, y) = \iint_F \varphi_x(\xi, \eta, x, y) q(\xi, \eta) \frac{(y-\eta)^2}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} dF + \\ + \iint_F \varphi_y(\xi, \eta, x, y) q(\xi, \eta) \frac{(x-\xi)^2}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} dF, \quad (2)$$

где F – площадь контакта с поверхностью, ξ, η - текущие координаты элементарной площадки пластины; $\varphi_x(\xi, \eta, x, y), \varphi_y(\xi, \eta, x, y)$ - коэффициенты трения скольжения в точке ξ, η , связанные годографом; $q(\xi, \eta)$ - нормальное давление на площадке в точке ξ, η ; x, y – координаты центра вращения. При этом предполагается, что трение анизотропно.

Несмотря на то, что такая модель является наиболее точной из рассмотренных, она требует значительных затрат вычислительной мощности. При этом необходимо аналитическое определение свойств поверхности в каждой точке ее взаимодействия с движителем, что в общем случае невыполнимо. Наиболее приемлемым

В литературе же посвященной физическим моделям, применяемым в интерактивных развлекательных приложениях, рассматриваются лишь общие принципы построения физических моделей [4].

Цель статьи. Усовершенствование некоторых элементов математической модели гусеничного движителя, связанных с учетом свойств поверхности, по которой осуществляется движение, а также различных механизмов и

узлов, влияющих на характер движения – таких как фрикционы, тормоза, трансмиссия и т.д.

Основной раздел. Основной проблемой при моделировании является учет сил трения и взаимодействия гусеницы с поверхностью. Эти силы распределены по всей поверхности соприкосновения движителя с грунтом. Причем, как указано в [3] коэффициенты сцепления могут быть разными для каждой точки соприкосновения, что требует вычисления громоздких интегральных уравнений. Однако в большинстве случаев такой подход является избыточным, поэтому вычислительная модель может быть значительно упрощена. Следует учитывать, что в реальных ландшафтах однородные поверхности имеют значительные протяженности, границы переходов между различными типами поверхности размыты, а коэффициенты сцепления отличаются незначительно. Тогда, можно принять, что для всей поверхности одного конечного элемента движителя (колесо, трак) сила давления на грунт и тип грунта совпадают, и вместо распределенных сил использовать одну общую, приложенную в геометрическом центре площадки контакта элемента движителя и грунта. Что позволит вместо интегральных уравнений применять достаточно простые алгебраические зависимости.

Силы взаимодействия с поверхностью F_r по своей природе являются силами трения и зависят от множества факторов, таких как: свойства движителя, сила давления на грунт, тип грунта, его влажность и т.д. Эти силы направлены на устранение разности скоростей между движителем и поверхностью.

В первом приближении можно считать, что сила трения при скольжении прямо пропорциональна произведению разности скоростей ΔV на давление движителя на грунт P_r :

$$F_r = S_r k_r \Delta V P_r, \quad (3)$$

где k_r - коэффициент, зависящий от свойств грунта и движителя, S_r - площадь контакта.

При отсутствии скольжения сила трения будет равна по модулю и противоположной по направлению силе, направленной на смещение объекта относительно поверхности. В этом случае может быть определено только максимальное значение, при превышении которого происходит переход в скольжение:

$$F_{rmax} = S_r k_{r2} P_r, \quad (4)$$

где k_{r2} - коэффициент сцепления при отсутствии скольжения.

В реальности сила давления на грунт будет определяться силой реакции подвески, так для колесного движителя можно записать:

$$P_r = \frac{F_z}{S_r}, \quad (5)$$

и, следовательно:

$$F_r = k_r \Delta V F_s. \quad (6)$$

В случае гусеничного движителя сила реакции подвески будет распределяться между несколькими траками, на которые опирается соответствующий каток, тогда, считая, что давление для каждого из траков одинаково:

$$F_r = k_r \Delta V \frac{F_s}{n}, \quad (7)$$

где n - число траков. Так число траков, взаимодействующих с поверхностью, как правило, велико, то такая модель достаточно точно будет отражать характер движения независимо от наличия или отсутствия границ и переходов между различными грунтами. Очевидно, что эту же формулу можно использовать и для колесного движителя, считая $n = 1$.

Коэффициент трения k_r может быть определен как:

$$k_r = k_{rg} k_{rd}, \quad (8)$$

где k_{rg} - составляющая, определяемая свойствами грунта, а k_{rd} - свойствами движителя.

Коэффициенты сцепления для различных грунтов можно получить из справочников [1, 2].

Далее следует учесть, что для большинства движителей коэффициенты сцепления в направлении движения, и в перпендикулярном направлении отличаются. Тогда, согласно принципу суперпозиции, силы трения могут быть разделены на две ортогональные составляющие F_{rf} - продольную и F_{rs} - поперечную, которые будут отличаться только коэффициентами трения движителя k_{rdf} и k_{rds} соответственно:

$$\begin{cases} F_{rf} = k_{rg} k_{rdf} \Delta V_f \frac{F_s}{n} \\ F_{rs} = k_{rg} k_{rds} \Delta V_s \frac{F_s}{n} \end{cases}, \quad (9)$$

где ΔV_f - проекция скорости на продольную ось техники, ΔV_s - на поперечную.

Для достижения более высокой степени реалистичности моделирования следует также учитывать различие в коэффициентах трения покоя и скольжения. В качестве начального используется коэффициент трения покоя (качения). Если на каком либо такте сила сцепления становится недостаточной, и возникает скольжение, то в качестве расчетного принимается коэффициент сцепления скольжения. Возврат к первоначальному коэффициенту происходит при условии, что сила трения скольжения превышает уровень, необходимый для того, чтобы полностью исключить смещение движителя относительно грунта. Следует также учитывать, что при выполнении поворота вся поверхность гусениц также переходит в режим скольжения, что влияет на коэффициенты сцепления как в продольном так и в поперечном направлении.

При движении техники, независимо от наличия или отсутствия скольжения, на движитель действуют силы, направленные на замедление движения. Эти силы зависят от скорости движения (вращения) и могут быть описаны некоторым интегральным коэффициентом k_t , называемого коэффициентом перекачивания [2] для каждого из типов грунтов. В простейшей модели сила сопротивления будет прямо пропорциональна скорости движения техники V и силе давления движителя на грунт. Поскольку разные элементы движителя могут взаимодействовать одновременно с несколькими типами грунтов, то и коэффициент k_t для них может отличаться, и, следовательно, силу также следует учитывать для каждого из элементов в отдельности:

$$F_t = k_t V \frac{F_z}{n}. \quad (10)$$

Таким образом, для реалистичного моделирования движения техники по ландшафту необходимо иметь набор грунтов, описываемых коэффициентами трения покоя k_{rgs} , трения скольжения k_{rgd} и сопротивления k_t отдельно для каждого из моделируемых типов движителя (колесный, гусеничный). Также, при необходимости, эти коэффициенты могут быть реализованы как функции влажности, что позволяет реалистично моделировать влияние погодных факторов (осадков).

В состав сил взаимодействия движителя F_r также входят силы, приводящие технику в движение. Одна из наиболее простых моделей может быть построена на основе алгоритма перераспределения кинетических импульсов. Пусть известна тяговая характеристика силовой установки техники. Тогда для определения энергии, приводящей технику в движение на каждом такте, расчет может быть разбит на следующие этапы:

1) расчет скорости вращения w_f движущихся частей силовой установки, так, как если бы силовая установка не имела связи с движителем, и вся вырабатываемая энергия накапливалась бы во вращающихся частях;

2) расчет скорости вращения w_d движущихся частей силовой установки на основе текущей скорости движителя, с учетом передаточных чисел всех промежуточных узлов трансмиссии, без учета вырабатываемой энергии силовой установки;

3) нахождение вращающего момента определяемого полученной разностью скоростей $w_f - w_d$;

4) перераспределение полученного вращающего момента ΔM между массой всей техники и вращающимися частями силовой установки, с учетом передаточных коэффициентов промежуточных звеньев трансмиссии.

Для нахождения разности моментов по пункту 3 приведенного алгоритма можно воспользоваться соотношением:

$$\Delta M_{rot} = J_\varepsilon \left(w_f - \frac{(J_\varepsilon w_f + J_t w_d)}{J_\varepsilon + J_t / k_p} \right), \quad (11)$$

где J_s - момент инерции вращающихся частей двигателя, J_t - некоторый приведенный момент инерции техники, определяемый массой техники и радиусом качения колеса, k_p - результирующий передаточный коэффициент трансмиссии.

Далее полученный момент ограничивается сверху фрикционными и движителем, то есть:

$$\Delta M = \min(\Delta M_{rot}, M_{fr}, M_d), \quad (12)$$

где M_{fr} - момент, который может быть передан фрикционом за одну дискрету времени, M_d - момент, который может быть реализован движителем за одну дискрету времени.

После этого, выполняется замедление вращения частей силовой установки на величину полученного момента, и эта же величина применяется в виде импульсов, распределенных по поверхности контакта движителя и ландшафта. Вследствие этого, работу всех сил взаимодействия F_r также следует рассматривать в виде набора импульсов, действующих на технику в местах соприкосновения движителя и грунта.

Выводы. Основным преимуществом такого алгоритма является возможность учета различных дополнительных условий. Очевидно, что величина момента, который может быть передан от силовой установки к движителю, ограничена сверху силами трения движителя и грунта. При превышении сил сцепления может возникнуть явление пробуксовки движителя. Кроме того, аналогичным образом, момент ограничивается трансмиссией и, в частности, системой фрикционов. Без учета этих систем, например, невозможно корректно реализовать работу педалей механика-водителя в процессе трогания с места или при переключении передач. При этом затраты вычислительной мощности позволяют моделировать в реальном времени одновременно несколько десятков гусеничных машин на одном неспециализированном процессоре.

Список литературы: 1. Балдин В. А. Теория и конструкция танков// В. А. Балдин. Академия бронетанковых войск им. Малиновского. Изд. академии. - М.: 1972. - 781 с. 2. Машиностроение. Энциклопедический справочник. В 15 томах. Том 11. А. Д. Абрамович, С. И. Березовский, Н. Ф. Вержбицкий. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва, 1948. - 456 с. 3. Кондаков С. В., Черепанов С. И. Моделирование взаимодействия гусениц с грунтом при неустановившемся повороте быстроходной гусеничной машины // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». - 2008. - Вып. 12 - № 23 (123). - Челябинск : Изд. ЮУрГУ. - С. 26-31. 4. Когнер Д. Физика для разработчиков компьютерных игр. Пер. с англ. А.С. Малявко. - М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. - 520 с.

Статья представлена д.т.н. проф. НТУ «ХПИ» Качановым П.А.

Поступила в редакцию 1.11.2011