

УДК 629.3.02

**Анализ возможности применения
существующих математических моделей
движения гусеничной машины по неровностям
местности для исследования динамических
процессов в гусеничном обводе**

Лупян М. Е.^{1,*}, Кузьминов К. С.¹

[*margarita-lupyan@yandex.ru](mailto:margarita-lupyan@yandex.ru)

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Статья содержит обзор различных способов моделирования взаимодействия ходовой части гусеничной машины с грунтовым основанием, как в отечественной, так и в зарубежной практике. Кроме того приведен обзор моделирования, используемый при моделировании движения гусеничной машины в режиме реального времени. Приведены различные достоинства и недостатки приведенных способов анализа. В статье описана проблема проектных расчетов гусеничной машины в отечественном машиностроении с использованием моделирования. Создание унифицированного метода анализа элементов системы подрессоривания гусеничной машины обозначено в качестве важной проблемы. Выявлены требования для математической модели необходимой для проектных расчетов элементов ходовой части гусеничной машины.

Ключевые слова: гусеничная машина, система подрессоривания, моделирование, проектный расчет, обзор

Введение

Ходовая часть гусеничной машины (ХЧ ГМ) является сложной многоэлементной системой, состоящей из элементов системы подрессоривания (подвески) гусеничного движителя: гусеничных лент; опорных и поддерживающих катков; направляющих и ведущих колес; механизмов натяжения гусениц. В процессе проектирования элементов ХЧ ГМ зачастую требуется оптимизация их конструкции с целью снижения веса при обеспечении необходимой прочности узлов и деталей.

До последнего времени оптимизация элементов ХЧ ГМ проводилась в ходе доводочных испытаний и эксплуатации изделия путем обработки большого количества экспериментальных данных, что требовало значительных временных затрат и увеличивало стоимость разрабатываемого объекта. С развитием вычислительной техники появилась возможность анализа нагруженности конструкции с использованием

программных комплексов, основанных на методе конечных элементов (МКЭ) ANSYS, NASTRAN и др. Однако, открытым оставался вопрос адекватного задания нагрузок на элементы ХЧ ГМ при расчете МКЭ. Данные нагрузки, опять же, брались из экспериментальных данных, так как аналитические зависимости давали достаточно грубую оценку.

Развитие имитационного математического моделирования динамических процессов, протекающих в различных механических, гидравлических, электрических и других системах, из которых состоит ГМ, дало новую возможность разработчикам получать динамические нагрузки, практически не прибегая к экспериментальным исследованиям, а используя их только для оценки адекватности и точности имитационной математической модели.

В нашей стране и за рубежом широко используются различные имитационные математические модели динамики колесных и гусеничных машин. Но так как каждая модель обычно разрабатывается для решения конкретной задачи со своими допущениями и ограничениями, то необходим анализ возможностей существующих моделей ГМ и оценка степени их пригодности для решения задачи определения нагруженности элементов ХЧ ГМ.

Моделирование ГМ разделяется на две системы: специализированное моделирование под конкретные цели (например ТРАК кафедры СМ9 МГТУ им. Н.Э. Баумана, используемый для подбора характеристик жесткости и демпфирования [1]) и универсальное многоэлементное моделирование, которое стало распространенным в связи с ростом производительности компьютеров. Специализированное моделирование при этом является наименее трудозатратным, но включает в себя много допущений и упрощений, таких как форма гусеницы и соединение траков, скорость движения машины, однозначное направление движения машины.

В существующих до настоящего времени моделях движения гусеничных машин не было возможности полностью, без каких-либо упрощений и допущений, учесть взаимодействие между траками гусеницы и землей и их влияние на динамику машины.

Существуют тенденции развития моделей, включающих в себя детальное описание траков гусеницы, узлов подвески и взаимодействия между ними. Разработаны модели для отдельных элементов систем, например модель взаимодействия грунт-колесо или грунт-колесо-трак. В настоящее время широко используется модель пружины для представления взаимодействия колесо-грунт.

Также существует проблема моделирования в реальном времени. Сложные многоэлементные модели ГМ, в которых учитывается каждый трак как твердое тело и жесткие или упругие соединения между ними, не являются лучшими для моделирования в реальном времени. Эти модели, состоящие из сотен элементов, применимы для экспериментирования и проектирования, но при этом расчет при помощи самой быстрой из этих моделей в разы медленнее движения в реальном времени. Создание моделей для исследования движения ГМ, позволяющих проводить расчеты, по времени сопоставимые

с временем, затрачиваемым на реальное движение, несет в себе сложности учета механики и топологии грунта, нелинейной механики гусеничного обода и взаимодействия колесотрак гусеница [2].

Обзор и анализ различных моделей

Детальная многоэлементная модель для динамического моделирования внедорожных гусеничных машин представлена в работе [3]. Элементами данной модели являются колеса, балансиры и каждый трак гусеницы. Силовые элементы используются чтобы описать взаимодействия между соединением траков с опорными катками и ведущим и направляющим колесами. Нормальные и тангенсальные силы вычисляются с использованием выражений классической механики грунтов, таких как корреляции Беккера и Джаноси. Прогрузание (утопление) и скольжение вычисляются отдельно для каждого трака. Использование в данной модели конкретной топологии ГМ, а именно бронированного перевозчика M113, демонстрирует сложность унификации моделей под различные ГМ.

Моделирование производилось в программном комплексе LMS-DADS, как в одном из наиболее используемых при моделировании динамических систем [4]. Гусеничные цепи в модели состоят из 63 звеньев, соединенный между собой шарнирами с силовыми элементами. Контакт звеньев с остальными элементами ходовой части такими как опорные катки, ведущее и направляющее колеса формализован с помощью нелинейных пружин и демпферов. Также учитывается трение с контактной поверхностью. Результаты моделирования были сопоставлены с результатами испытаний M113 на различных почвах, опубликованными Вонгом [5] (рис.1). Для этого модель и испытываемые грунты максимально повторяли использованные Вонгом при условии отсутствия части исходных данных. Часть исходных данных бралась из других источников. В экспериментах Вонга тяговая сила вызывала проскальзывание. В данной модели тяговая сила была приложена к центру тяжести ГМ в горизонтальном направлении. Точка приложения тяговой силы и ее направление могут значительно повлиять на результаты. Однако из графиков виден идентичный характер изменения нагрузок при различных способах их получения.

Способы упрощенного представления динамики ГМ дают приемлемые результаты при решении задач, связанных с плавностью хода. В части моделей [1,4] влияние гусеничного обода на плавность хода учитывается упрощенно. Однако гусеничный обод целесообразно использовать в качестве передающего звена между ведущими колесами и опорными катками с грунтом при моделировании продольного перемещения машины [6, 7]. В математической модели [6] удалось не только дополнительно реализовать моделирование поперечно-угловых колебаний машины (помимо вертикальных, продольных и продольно-угловых) за счет разного профиля под левой и правой гусеницей, но позволить формировать скорость движения ГМ в зависимости от частоты

вращения ведущих колес и условий движения, с учетом отрыва катков от опорной поверхности, юза и буксования движителя.

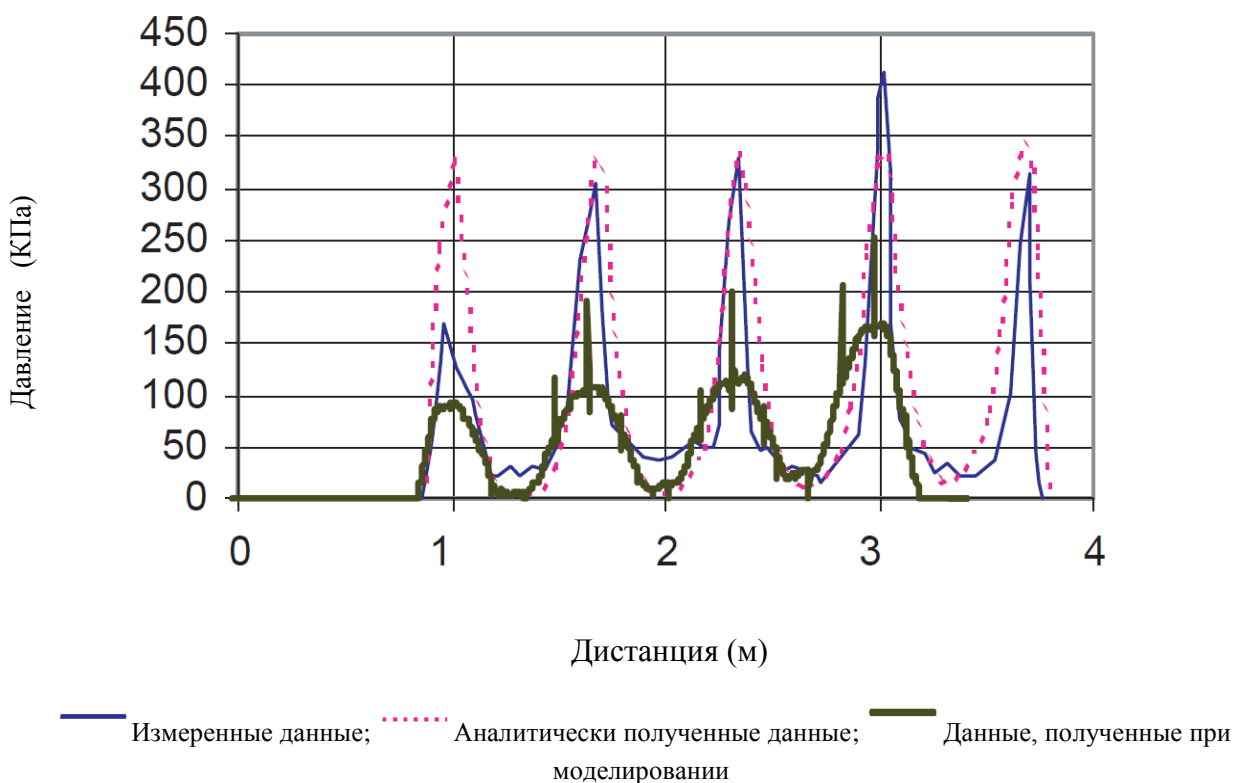


Рис. 1. Сравнение данных эксперимента и моделирования

Допущения модели [6] позволяют рассматривать гусеницы в качестве невесомых растяжимых лент. Каждая гусеница состоит из последовательно связанных между собой участков, в пределах которых растягивающее усилие неизменно. На соседних участках усилия могут быть различными (рис.2), однако на границах строго должно выполняться соотношение, определяющее равновесие гусеничного обвода

$$P_j - P_{j+1} + R_j = 0, \quad (1)$$

где P_j - растягивающее усилие на j -ом участке гусеницы; R_j - реакция связи на границе j -го и $(j+1)$ -го участков. Таким образом, границы участков определяются точками, где возможно возникновение продольных реакций связей, наложенных на обвод. Это - места зацепления ведущих колес, площадки контакта опорных катков, ведущих и направляющих колес с опорным основанием, которые полагаются точечными. На каждом шаге моделирования старшие производные по обобщенным координатам должны определяться по дифференциальным уравнениям, составленным для системы, в которой для всех участков гусеничного обвода выполняется соотношение (1).

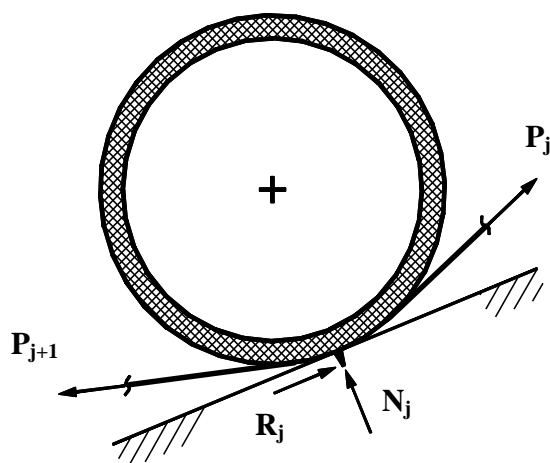


Рис. 2. Силы в гусеничном обводе

N_j - нормальная реакция опоры

Вследствие передвижения катков машины по опорному участку гусеницы, вращения ведущего колеса, явления юза и буксования происходит постоянное перераспределение звеньев гусеницы между участками. Поэтому до вычисления производных на каждом шаге необходимо дополнительно решать задачу о равновесии невесомой гусеничной ленты (рис. 3.).

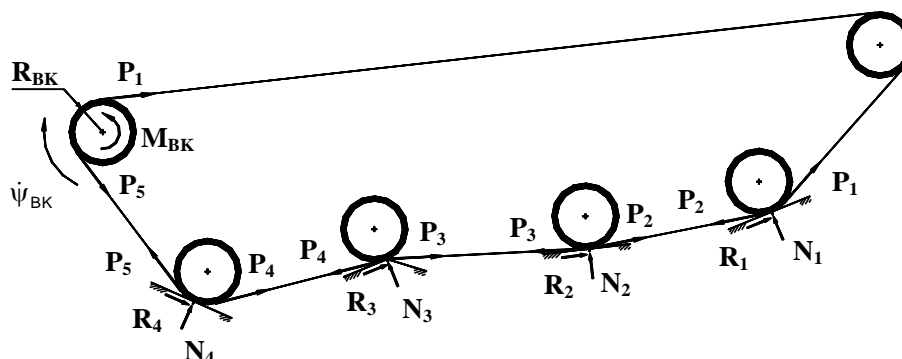


Рис. 3. Равновесие гусеничного обвода

R_{BK} - радиус ведущего колеса ГМ, M_{BK} - момент на ведущем колесе, $\dot{\psi}_{BK}$ - угловая скорость вращения ведущего колеса, P_j - растягивающее усилие на j -ом участке гусеницы; R_j - реакция связи на границе j -го и $(j+1)$ -го участков

Математическая модель гусеничного обвода [8] представляет из себя точечные массы, соединенные упруго-демпфирующими связями. Такой же подход фигурировал в [9], но в данном случае массами заменяются не все траки, а только те точки гусеницы, в которых возможно возникновение продольных сил (рис.4)., т.е. места зацепления

ведущего и направляющего колеса и точки контакта опорных катков с опорным основанием. Время расчета при использовании данной математической модели сопоставимо с временем затрачиваемом машиной на движение по анализируемому участку пути при работе, выполненной в программном пакете Matlab/Simulink на ЭВМ без дополнительных вычислительных мощностей помимо стандартных. Но в данной модели взаимодействие гусеницы с грунтом предельно упрощено и так же по причине плоскостности модель не выдает нагрузки на гусеницы в режиме поворота.

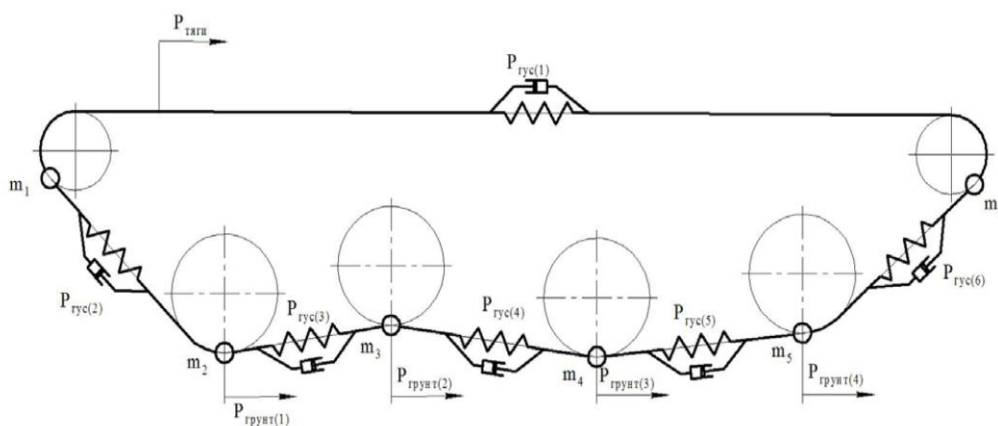


Рис.4. Модель гусеничного обвода

m_2, m_3, m_4, m_5 - масса опорных катков, m_1 и m_6 - масса ведущего и направляющих колес, $P_{тяги}$ - сила тяги, развиваемая машиной, $P_{грунт}$ - реакция грунта под соответствующим опорным катком, $P_{гус}$ - реакция в соответствующем участке гусеничного обвода

Помимо математических моделей движения ГМ, применяемых исключительно для формульного анализа, в последние годы появилось несколько конечно-элементных моделей. Толчком к этому послужило развитие блоков инженерного анализа различных систем автоматического проектирования (САПР).

Существуют конечно-элементные модели разработанные в программном пакете MCS, ADAMS/View. Данный программный пакет предназначен для динамического моделирования механических систем, который доступен в виде студенческих лицензий повсеместно. В этом продукте нет специально приложения для моделирования гусеничных машин. Механические элементы могут быть созданы как в программном пакете, так и импортированы из других САПР.

При моделировании ходовой части мобильного робота [10] все элементы размещались вручную, так же с помощью плоского шарнира было необходимо сохранить все траки в одной плоскости. В процессе создания деталей ГМ непосредственно в MCS.ADAMS/View (рис.5) невозможно было воссоздать конструкцию зубьев ведущего

колеса, что негативно влияет на результаты моделирования. Время расчета таких моделей может занимать несколько часов. Так же важно задание контакта между деталями гусеничной машины и грунтом. Так в приведенной в источнике [10] модели задавался контакт каждого трака (около 100 точек контакта), что привело к увеличению времени расчета. Данная модель, при условии точной геометрии, может быть использована для исследования параметров подвески и определение их оптимальных значений.

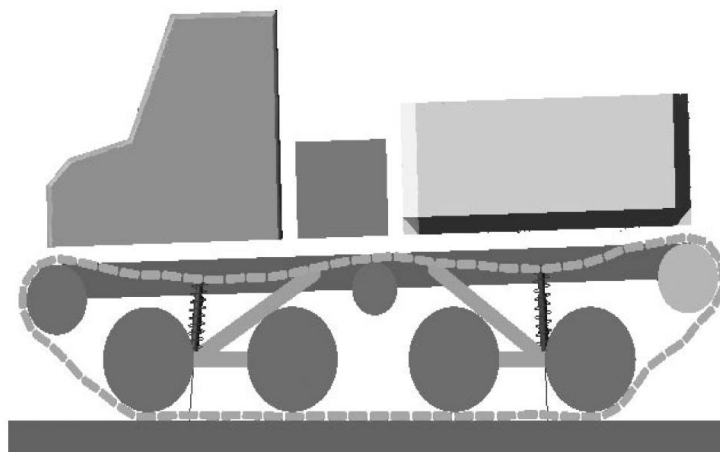


Рис.5. Модель гусеничной машины в MCS.ADAMS/View

Для моделирования движения гусеничных машин фирмой MSC/Software был разработан модуль ATV [4]. В данном модуле можно исследовать движение как на твердых, так и на мягких грунтах. Для моделирования ГМ разбивается на подсистемы, которые обрабатываются отдельно, а затем интегрируются в общую сборку машины. Подсистемы включают в себя корпус, узлы подвески с прикрепленными опорными катками, поддерживающие катки, систему натяжения с прикрепленным направляющим колесом, ведущее колесо и силовую цепь, траки. Такое разделение позволяет быстро и просто собирать в модуле различные типы ГМ.

В модуле ATV есть много полезных функций, включающих в себя автоматическое оборачивание гусеничной цепи вокруг опорных катков, силовые элементы между траками гусеницы, гусеничная лента может быть как многоэлементной, так и единой с одной степенью свободы. В данный модуль можно загрузить профили грунта, используя стандартный файл программного пакета ADAMS(.rtf), автоматическое приложение силы трения между траками гусеницы и вращающимися элементами. Все перечисленное выше делает данный модуль удобным при моделировании как военной техники, оперирующей на больших скоростях и различных грунтах, так и техники общего назначения.

При твердотельном моделировании движения ГМ отдельным вопросом является способ задания грунтового основания. В зависимости от цели моделирования можно использовать как недеформированные, так и деформируемые грунты. В описанном выше модуле ATV рекомендуется использовать недеформируемые грунты по нескольким причинам. Во-первых, описание такого типа грунтов относительно просто. Во-вторых, при правильном выборе параметров грунтового основания, таких как жесткость и демпфирование, время моделирование относительно короткое, тогда как моделирование движения машины по мягкому деформируемому грунту может занять от 30 минут до нескольких часов в зависимости от возможностей конкретного компьютера.

Контакт двух тел в модуле ATV при условии их одинаковой плотности рассматривается следующим образом (рис. 6):

$$F_n = K \cdot d^e - c_{max} \cdot \dot{d}, d \geq d_{max}, \quad (2)$$

$$F_n = K \cdot d^e - c_{step} \cdot \dot{d}, d \leq d_{max}. \quad (3)$$

Здесь F_n - нормальная сила взаимодействия; K - жесткость, c_{max} - максимальный коэффициент демпфирования; d_{max} - глубина проникновения при максимальном коэффициенте демпфирования; c_{step} - коэффициент демпфирования зависящий от текущего проникновения d .

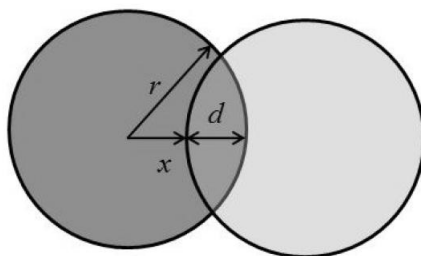


Рис. 6 Две столкнувшиеся сферы

R - радиус сфер, d - глубина проникновения сфер друг в друга

Так же моделирование движения гусеничной машины можно проводить в Chrono:Engine, разработанной профессором Тасора (университет Пармы, Италия). Это программное обеспечение решает задачи с большим количеством твердотельных контактов, возникающих при гранильном моделировании грунтового основания. Элементами этого программного обеспечения являются сферы (рис.7.).

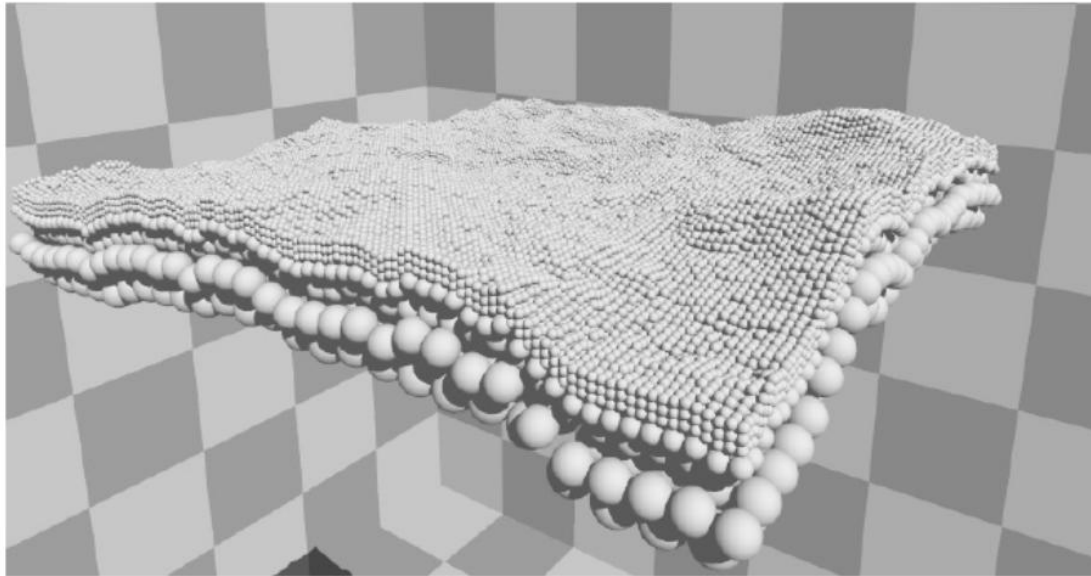


Рис.7. Пример грунтового основания

Создание грунтового основания может быть произведено двумя методами: случайное наполнение среды моделирования, при котором сферы грунта создаются в случайных местах и под действием силы тяжести образуют рельеф грунтового основания; наполнение согласно известному профилю.

Помимо грунтового основания в данном программном обеспечении на сферические части разбиваются все элементы ГМ (рис. 8).

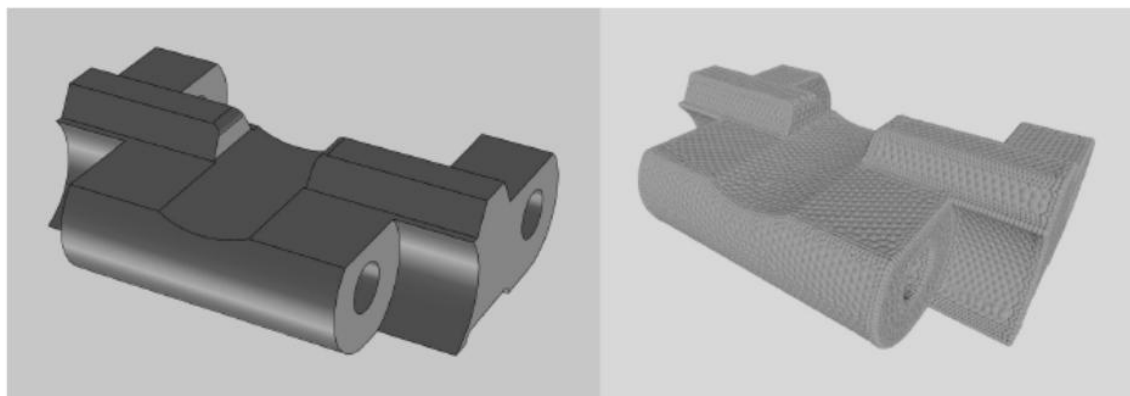


Рис.8 Трак гусеницы

Совершенно отдельной проблемой считается моделирование движения ГМ в режиме реального времени, которое активно используется для создания визуальных симуляторов и тренажеров по управлению ГМ. Такое моделирование используется, например, для обучения управлению мобильными роботами [11].

Сложные многоэлементные модели ГМ, при всей своей точности и соответствии реальным машинам, неэффективны при использовании их в режиме реального времени. При использовании стандартных современных компьютеров, с учетом многопроцессорности и возможности параллельного проведения расчета, анализ с помощью подобных моделей занимает время большее чем движение ГМ по анализируемому участку.

Сложность математических моделей ГМ требует использования программного кода, который в режиме реального времени сохранял бы физику взаимодействия гусеничного обвода и системы подрессоривания. Это приводит к сложностям описания топологии грунтов, нелинейной динамики взаимодействия элементов системы трак-колесо-грунт и требует сохранения особенностей конструкции конкретной ГМ.

Одна из предложенных в [11] моделей рассчитывает взаимодействие гусеницы с грунтом с помощью силовых элементов между грунтом и опорными катками и не включает в себя описание гусеницы как твердого тела. Это фактически приводит гусеничную машину к колесной. Такую модель возможно использовать при движении машины по гладким неровностям. При расчете процесса преодоления ГМ препятствий типа вертикальный уступ, когда влиянием гусеницы на динамику передвижения ГМ пренебречь невозможно, данная модель не может быть использована ряда дополнений. Поэтому, взаимодействие гусеницы с грунтом учитывается в данной модели с помощью дополнительных сил действующих на опорные катки. Эти силы зависят от конструкции опорного катка и «проникновения» нервноностей опорного основания за проекцию гусеницы.

Весь алгоритм основан на плоскостной модели ходовой части. Нормальная сила, действующая на трак, пропорциональна площади «проникновения» катка в сегмент грунта при вертикальном перемещении центра катка (рис. 9) Такой алгоритм расчета позволяет сохранять небольшое время каждого шага анализа, что позволяет применять его при моделировании гусеничной машины в режиме реального времени.

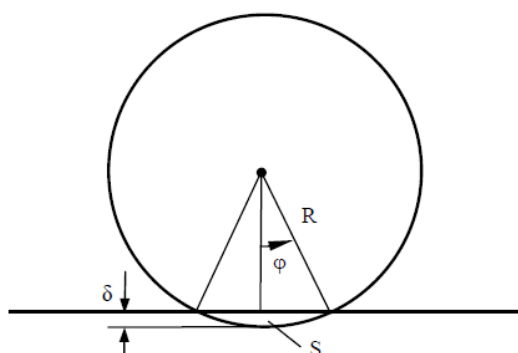


Рис. 9 Проникновение катка в грунт при вертикальном перемещении

δ - глубина проникновения опорного катка в грунт, R - радиус опорного катка, S - площадь проникновения опорного катка в грунт, φ - угол соответствующий половине сектора проникновения катка в грунт

Модель [11] предполагает проведение анализа в три этапа. На первом этапе определяется текущее положение корпуса машины. Отношение между корпусом машины и составными частями ходовой части зафиксированы в модели. На втором этапе происходит определение линии пересечения опорных катков с грунтом. На третьем этапе происходит расчет контактных сил.

Алгоритм, предложенный в [11], включает в себя описание грунтовых оснований, используемых в качестве тренировочных для обучения управления мобильными роботами.

Планируемая математическая модель ходовой части гусеничной машины

В целях проведения проектных расчетов опорных катков гусеничной машины создается математическая модель ГМ в системе Matlab Simulink. В настоящее время в проектировании ГМ отсутствует обоснованная методика расчета данного элемента машины, в то время как опорный каток является одним из ответственных элементов ХЧ ГМ.

Проектируемая модель должна отвечать следующим требованиям.

Для проведения проектных расчетов элементов ХЧ ГМ от модели требуется, в первую очередь, хорошая унификация под различные типы машины, наличие большой базы данных и быстрой адаптации под различные исходные данные.

Модель должна позволять исследовать динамические процессы в ХЧ ГМ как в прямолинейном движении, так и в режиме поворота, что возможно не во всех существующих моделях.

Все допущения используемые в модели должны быть проанализированы с точки зрения влияния на полученный результат.

Для прочностного расчета отдельных элементов ХЧ ГМ модель должна позволять в явном виде получить все нагрузки действующие на эти элементы.

Заключение

При проектировании ГМ в отечественном машиностроении по-прежнему пользуются проектными и поверочными аналитическими расчетами, прибегая к моделированию для конкретных исследований. В случае конечно-элементного моделирования нагрузки на элементы ГМ также в основном получают аналитическим путем. Не существует единой методики проектного расчета составных элементов ходовой части ГМ, в которой бы совместно бы было применено математическое и твердотельное моделирование движения ГМ.

В настоящее время существует много различных математических моделей динамики движения гусеничной машины с различными способами визуализации результатов. Все математические модели созданы для решения конкретных задач: оценки плавности хода

или профильной проходимости и т.д. Общей модели, позволяющий определить нагрузки на элементы ХЧ ГМ как при прямолинейном движении по неровностям местности, так и в повороте, не существует. Основная сложность создания такой модели заключается в моделировании взаимодействия элементов системы опорные катки - гусеница - опорное основание в указанных режимах движения.

Список литературы

1. Дядченко М.Г., Котиев Г.О., Наумов В.Н. Основы расчета систем поддрессоривания гусеничных машин на ЭВМ: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 52 с.
2. Madsen J., Heyn T., Negrut D. Methods for Tracked Vehicle System Modeling and Simulation. Technical Report 2010-01. University of Wisconsin, 2010. 56 p.
3. Rubinstein D., Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicle // Journal of Terramechanics. 2004. Vol. 41, iss. 2-3. P. 163-173. DOI: [10.1016/j.jterra.2004.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.02.004)
4. Sharp R.S. The application of multi-body computer codes to road vehicle dynamics modeling problems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D. Journal of Automobile Engineering. 1994. Vol. 208 (D1). P. 55-61.
5. Wong J.Y. Terramechanics and off-road vehicles. New York: Wiley-Interscience, 1989. 488 p.
6. Котиев Г.О. Прогнозирование эксплуатационных свойств систем поддрессоривания военных гусеничных машин: дис. ... докт. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 265 с.
7. Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Комплексное поддрессоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 184 с.
8. Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Математическая модель гусеничного обвода // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/245694.html> (дата обращения 01.10.2014).
9. Платонов В.Ф. Динамика и надежность гусеничного движителя. М.: Машиностроение, 1973. 293 с.
10. Matej J. Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC.ADAMS/View// Res. Agr. Eng. 2010. Vol. 56, no. 1. P. 1-7.
11. Agapov D., Kovalev R., Pogorelov D. Real-time model for simulation of tracked vehicles // Proc. of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics (Brussels, Belgium, 4-7 July, 2011). 2011. 8 p.

Analysing Possible Applications for Available Mathematical Models of Tracked Vehicle Movement Over the Rough Terrain to Examine Tracked Chain Dynamic Processes

M.E. Lupyan^{1,*}, K.S.Kuzminov¹

[*margarita-lupyan@yandex.ru](mailto:margarita-lupyan@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: tracked vehicle, suspension, simulation, engineering analysis, review

The article offered for consideration provides a survey of methods to study a tracked vehicle movement over unpaved grounds and obstacles using various software systems. The relevant issue is to optimize chassis elements of a caterpillar at the design stage.

The challenges, engineers face using different methods to study the tracked vehicle elements, are given. Advantages of using simulation to study a state of the various components of the loaded chassis are described. Beside, an important and relevant issue is brought up i.e. modeling a vehicle movement in real time.

While writing an article, different modeling methods for an interaction between a tracked vehicle chassis and an underlying subgrade used both in domestic and in foreign practice have been analysed. The applied analytical assumptions in creating these models and their basic elements are described. The way to specify an interaction between the track and road wheels of a caterpillar, crawler belt specification, and interaction between its elements have been analysed in detail as well. Special attention was also paid to the various ways of specifying the subgrade both in planar models and in models enabling us to study all chassis elements of a caterpillar as a whole.

In addition to the classical simulation of tracked vehicle movement used to analyse Ride qualities of tracked vehicle and loaded state of various chassis elements, is offered a model used to simulate a movement coil in real time.

The article presents advantages and disadvantages of different models of movement in terms of engineering analysis of caterpillar elements. A task to develop a simulation model of caterpillar movement is set. Requirements for a model in case of its use in engineering analysis of chassis elements of a caterpillar are defined. A problem of a lack of the single technique to conduct engineering analysis of tracked vehicle chassis is noted.

References

1. Dyadchenko M.G., Kotiev G.O., Naumov V.N. *Osnovy rascheta sistem podressorivaniya gusenichnykh mashin na EVM* [Basis of computer-based analysis of tracked vehicle suspension system]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 52 p. (in Russian).
2. Madsen J., Heyn T., Negrut D. *Methods for Tracked Vehicle System Modeling and Simulation*. Technical Report 2010-01. University of Wisconsin, 2010. 56 p.
3. Rubinstein D., Hitron R. A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicle. *Journal of Terramechanics*, 2004, vol. 41, iss. 1-2, pp. 163-173. DOI: [10.1016/j.jterra.2004.02.004](https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.02.004)
4. Sharp R.S. The application of multi-body computer codes to road vehicle dynamics modeling problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D. Journal of Automobile Engineering*, 1994, vol. 208 (D1), pp. 55-61.
5. Wong J.Y. *Terramechanics and off-road vehicles*. New York, Wiley-Interscience, 1989. 488 p.
6. Kotiev G.O. *Prognozirovaniye ekspluatatsionnykh svoystv sistem podressorivaniya voennykh gusenichnykh mashin. Dokt. dis.* [Forecasting of operational properties of systems of cushioning of military tracklaying vehicles. Dr. dissertation]. Moscow, Bauman MSTU, 2000. 265 p. (in Russian).
7. Kotiev G.O., Sarach E.B. *Kompleksnoe podressorivaniye vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin* [Complex cushioning of highly mobile two-element caterpillar machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 184 p. (in Russian).
8. Sarach E.B., Stadukhin A.A. Track mathematical modeling. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 10. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/245694.html> , accessed 01.10.2014. (in Russian).
9. Platonov V.F. *Dinamika i nadezhnost' gusenichnogo dvizhitelya* [Dynamics and reliability of caterpillar engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 293 p. (in Russian).
10. Matej J. Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC.ADAMS/View. *Res. Agr. Eng.*, 2010, vol. 56, no. 1, pp. 1-7.
11. Agapov D., Kovalev R., Pogorelov D. Real-time model for simulation of tracked vehicles. *Proc. of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*, Brussels, Belgium, 4-7 July, 2011, 8 p.