

УДК 621.87:658.512.011.56

**И. В. Лесковец, канд. техн. наук, доц., В. В. Береснев, канд. техн. наук, доц.**

## **МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН**

В статье рассмотрены подходы к моделированию сложных систем. Приведена классификация современных программных средств, занимающихся автоматизацией имитационного моделирования. Предложен подход к моделированию гусеничных машин, который построен на разработке специализированного программного обеспечения, состоящего из нескольких модулей, направленных на создание имитационных моделей различных элементов машины на основании заранее разработанных методов.

В настоящее время проектирование и расчеты гусеничных машин осуществляются на основании методик, разработанных в 70–90 гг. XX в. Состояние вычислительной техники на тот момент не позволяло широко применять специальное программное обеспечение – пакеты визуального моделирования (Simula, SLAM, НЕДИС и др.). Системы автоматизации моделирования были сложны для пользователя и требовали специальной подготовки, особенно в части текстового описания модели.

Сложность изучаемых и проектируемых систем приводит к необходимости создания специальной, качественно новой техники исследования, использующей аппарат имитации – воспроизведения на ЭВМ специально организованными системами математических моделей функционирования проектируемого или изучаемого комплекса [1]. Сегодня использование технологии объектно-ориентированного моделирования, получившей свое развитие благодаря развитию вычислительной техники, стало стандартом для систем автоматизации проектирования, что позволило расширить границы применимости и повторного использования уже созданных и подтвердивших свою работоспособность моделей.

Одним из достоинств систем визуального моделирования является то, что они доступны широкому классу пользователей, которые не задумываются о программной реализации модели. Программная реализация «скрыта» от пользователя, и при недостаточности опыта и квалификации повышается вероятность получе-

ния «неверных» результатов, что выводит на первый план проблему проверки достоверности полученного решения.

Проблема «графической оболочки» в большинстве современных программных продуктов высокого уровня решена, пользователю представляется возможность самому настроить численный метод или выбрать наиболее подходящий. Однако в пакетах среднего уровня, которые используются наиболее интенсивно на персональных компьютерах, процесс выбора решателя производится самой системой, поэтому пользователь зачастую может получить красиво оформленный «неверный» результат. Зачастую ошибка состоит в том, что пользователь ставит перед программой задачу, которая не может быть решена системой ввиду её ограничений со стороны математического аппарата.

Структура современных имитационных моделей должна соответствовать структуре изучаемого объекта. Модели, имеющие сложную архитектуру, состоят из множества блоков, которые связаны функциональными взаимосвязями. Блоки могут характеризоваться различными физическими принципами действия. Сложная имитационная модель имеет несколько качественно различных постепенно сменяющих друг друга состояний либо решение одной сопряженной задачи.

По предложенной классификации Ю. Б. Колесова [2] и Ю. Б. Сениченкова программные средства автоматизации проектирования можно разделить на три класса:

- пакеты «блочного моделирования»;
- пакеты «физического моделирования»;
- пакеты, ориентированные на схему гибридного автомата.

К наиболее известным пакетам блочного моделирования можно отнести подсистему SIMULINK пакета MATLAB (MathWorks, Inc.) и EASY5 (Boeing).

Преимущество объектно-ориентированной технологии состоит в том, что можно создать достаточно сложные модели, не обладая специальными знаниями. При разработке сложных моделей, которые имитируют реальное поведение объекта, создаются сложные алгоритмы, которые и являются основным недостатком пакетов.

Программные средства по второму и третьему пункту следует, на наш взгляд, рассматривать как единое целое. Современные тенденции при разработке программных средств показывают, что описание сложных систем, механизмов становится все более простым, и в конечном итоге опять ограничено современным уровнем развития вычислительной техники.

К представителям пакетов второго и третьего уровней можно отнести программный комплекс ADAMS корпорации MSC, подпрограмму Universal Mechanism (Брянский государственный технический университет), используемую в составе пакета КОМПАС, и подсистему Эйлер пакета TFEX.

Для реализации проблемы обмена данными между пакетами объектно-ориентированного программирования группой ученых разработан язык Modelica, предлагаемый в качестве стандарта при обмене описаниями моделей между различными пакетами.

Имитационное моделирование мобильных машин является наиболее мощным средством исследования взаимодействия с грунтом. Преимуществом такого подхода является возможность проводить

вычислительные эксперименты с проектируемой системой, натурные эксперименты с которой слишком дороги или нецелесообразны по соображениям безопасности.

Программное обеспечение различных производителей предоставляет конструкторам целый ряд возможностей для проведения статических и динамических расчетов с целью получения оптимальных характеристик машин на стадии проектирования. Наиболее широкое распространение в этой области нашли программные продукты, основанные на использовании метода конечных элементов (МКЭ). За последние 10 лет этот метод успешно совершенствовался и нашел широчайшее применение в ряде областей науки и техники. Однако наряду с широкими возможностями МКЭ имеет ряд недостатков, из-за которых его использование при решении задач, где присутствует большое количество подвижных элементов, невозможно либо требует затрат такого количества ресурсов и времени, что его применение крайне неэффективно. К таким задачам относятся задачи проектирования гусеничных машин, систем управления с большим количеством подвижных элементов и другие. В ряде случаев конструкторы и ученые успешно применяют системы реализации математических моделей, основанные на современных математических методах моделирования. Такие системы также имеют ряд недостатков, к которым можно отнести: необходимость разработки уникальных математических моделей в каждом конкретном случае; высокая квалификация работников; невозможность визуализации поведения проектируемой системы; большое время, требуемое для расчета из-за работы таких систем в режиме «интерпретатора».

В общем случае гусеничная машина представляет собой сложную динамическую систему, которую можно определить как «ВНЕШНЯЯ СРЕДА – ДВИЖИТЕЛЬ – КОРПУС –

ТРАНСМИССИЯ – ДВИГАТЕЛЬ – ОПЕРАТОР». Каждый из перечисленных элементов обладает определенными свойствами и определенным образом взаимодействует с соседними элементами. Данное взаимодействие описывается математическими моделями. Каждая из моделей представляет собой структуры данных и методов расчета. В некоторых случаях модели имеют переменную структуру, т. е. требуют в зависимости от различного состояния однотипных элементов применения различных методов расчета. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что наиболее эффективным для реализации общей имитационной модели машины является использование метода функциональных элементов (МФЭ). Применение данного метода предполагает создание различных моделей машины, обладающих совокупностью исходных данных и соответствующих им методов расчета. Функциональный элемент, таким образом, содержит в себе данные, характеризующие свойства моделируемого объекта и математическую модель или модели, определяющие выходные параметры моделируемого элемента. С внешним воздействием элемент связан при помощи специальных методов, обеспечивающих прием данных от взаимодействующего элемента; выходные параметры определяются набором выполненных вычислений и методами (или методом) передачи данных к взаимодействующему элементу. Для оперативного изменения данных или свойств элемента необходимо иметь библиотеку однотипных элементов, обладающих разными свойствами. В данном случае пользователь, определив граничные параметры исследуемой системы и заранее создав библиотеку данных, может оперативно изменять исходные данные, методы воздействия на систему в целом и на отдельный элемент, получать требуемую информацию. Учитывая, что гусеничная машина состоит из ряда систем и подсистем, необходимо разработать структурные единицы элементов, которые могут входить в более

сложные элементы.

Создание модели поведения оператора – задача практически невозможная, т. к. его поведение зависит от множества факторов, например состояния микропрофиля и макропрофиля дороги, вида производимых работ, операций с рабочим оборудованием, состояния самого оператора, его квалификации и других субъективных факторов. В связи с этим предположим, что имитационная модель должна позволять пользователю самому моделировать поведение оператора. Структурная модель двигателя может состоять из нескольких элементов, в зависимости от типа двигателя. В любом случае выходными параметрами является крутящий момент на коленчатом валу и угловая скорость коленчатого вала двигателя. В случае, когда применяется дизельный двигатель с турбонаддувом, предлагается определять зависимость момента двигателя как функцию цикловой подачи топлива и давления наддува турбокомпрессора:

$$M_d = f(p_k, q_c),$$

где  $p_k$  – давление наддува турбокомпрессора;  $q_c$  – цикловая подача топлива.

Цикловая подача в этом случае описывается, как

$$q_n = f(\omega_d, \gamma_n),$$

где  $\omega_d$  – угловая скорость коленчатого вала,  $\gamma_n$  – положение педали акселератора.

Давление наддува турбокомпрессора представляет собой функцию цикловой подачи и угловой скорости коленчатого вала:

$$p_k = f(\omega_d, q_n).$$

В данном случае задающим воздействием является положение педали акселератора и момент сопротивления на коленчатом валу двигателя. Разумеется, подобный подход не позволит исследовать множество процессов, происходящих в двигателе во время работы, например процесс наполнения камеры сго-

рания свежим зарядом, процесс воспламенения, процесс теплопередачи от стенок камеры сгорания во внешнюю среду и многие другие процессы. Все эти процессы являются темами отдельных работ и их рассмотрение в модели машины на данном этапе не представляется целесообразным и в связи с высокой сложностью не разрешимы в общей модели машины. Поэтому в данной модели предлагается использование регрессионных моделей, которые, как показывает практика, дают хорошие результаты при проведении исследований.

Следующим структурным элементом является трансмиссия. В элементы трансмиссии могут входить гидротрансформатор, сцепление, коробка передач, главная передача. В случае применения плоской модели рассмотрение дифференциала не представляется возможным. Для механической трансмиссии с гидротрансформатором (ГДТ) в модели ГДТ моменты на насосном и турбинном колесах ГДТ определяются по известным выражениям:

$$M_n = D_a^5 \cdot \rho \cdot \lambda_n \cdot \dot{\varphi}_n^2;$$

$$M_T = K \cdot M_n,$$

где  $D_a$  – активный диаметр гидротрансформатора;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\lambda_n$  – коэффициент момента насосного колеса ГДТ;  $K$  – коэффициент трансформации.

Коэффициент момента насосного колеса и коэффициент трансформации определяются с помощью регрессионных зависимостей, полученных на основе опытных данных после испытаний ГДТ. Входным воздействием в данном случае является крутящий момент на входном валу ГДТ, а выходным – момент сопротивления на выходном валу. Для коробки передач и главной передачи входными воздействиями являются крутящий момент на первичном валу коробки передач, момент сопротивления на валу ведущего колеса, номер включенной передачи. Определение выходного крутящего момента производится с использованием переда-

точного числа трансмиссии. Нагрузки, возникающие в трансмиссии, передаются на корпус машины, однако, считая корпус недеформируемым, определим эти нагрузки как внутренние, не оказывающие воздействия на выходные параметры машины, и в данной модели не учитываем.

Наиболее сложной системой в данной модели является движитель. Создать однозначную модель его невозможно, т. к. в каждый момент времени на каждый элемент движителя воздействуют разные элементы (это относится к тракам и колесам). Возможна разработка однозначной модели по отношению к подвескам и корпусу машины. Линейные и угловые перемещения корпуса машины являются функцией перемещения опорных колес машины. В данном случае входным воздействием на опорное колесо является перемещение трака, находящегося под этим колесом и перемещение корпуса машины. Трак является наиболее простым элементом с точки зрения представления, однако это самый сложный элемент с точки зрения описания входных воздействий. В качестве постоянных входных воздействий можно определить воздействия от перемещения соседних траков по осям абсцисс, ординат и их поворот в плоскости ХОУ, при рассмотрении плоской модели машины. В качестве переменных воздействий, т. е. изменяющихся во времени, примем перемещения опорных колес, поддерживающих колес, ведущего и направляющего колес, изменение микро- и макропрофиля дороги. Кроме того, для ведущего колеса необходимо задание дополнительных ограничений, т. к. оно создает дополнительные усилия, обеспечивающие возникновение силы тяги.

Внешняя среда в данном случае может быть представлена в виде моделей микропрофилей дороги, которые предполагается использовать в данной системе (в настоящее время достаточно широко используются в различных исследованиях). Фактически это корреляцион-

ные функции, позволяющие определить ординаты микропрофиля в заданной точке в зависимости от представляемого типа дороги. Модели макропрофилей менее изучены в связи с тем, что в их формировании принимают участие сами машины, их скорости движения, нагрузки на опорные колеса, собственные частоты колебаний. Наиболее перспективным нам представляется задание модели макропрофиля в виде полинома либо в виде синусоидальной зависимости с представлением пользователю самостоятельно сформировать требуемую модель.

На основании вышеизложенного анализа можно предположить, что для моделирования гусеничной машины перспективным является разработка специализированного программного обеспечения, состоящего из нескольких моделей, направленных на создание имитационных моделей различных элементов машины на основании заранее разработанных методов. МФЭ предполагает использование классов в терминологии языков программирования высокого уровня. Каждый из созданных классов должен быть одновременно и объектом общей модели машины и объектом отдельного модуля, в котором задаются его параметры и характеристики. Объединение всех классов в одну структуру позволит пользователю оперативно изменять вводимую информацию, содержащую характеристики исследуемых объектов, и получать результаты моделирования в виде численной и графической информации, позволяющей проводить многокритериальную оптимизацию с целью получения параметров отдельных элементов машины, удовлетворяющих поставленным задачам.

Использование такого программного обеспечения позволяет получить уточненные результаты условий работы машины на различных стадиях рабочих процессов. Возможно рассмотрение работы машины в целом и ее элементов при агрегатировании с различным рабочим оборудованием. Пользователю представ-

ляется возможность анализа самых разнообразных задач, решение которых требуется при проектировании, совершенствовании и модернизации гусеничных машин. К таким задачам можно отнести 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 в динамике, т. е. при движении машины, при заглаблении и выглаблении рабочих органов, при анализе процессов, происходящих в стадии разработки материала, в настоящее время эти задачи решаются при использовании усредненных данных. Для быстроходных машин возможно проведение анализа нагружения гусеничного обвода при движении по микро- и макропрофилю опорной поверхности. 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. Это 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 и уменьшить количество ошибок при проектировании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моисеев, Н. Н.** Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1981. – 488 с.
2. **Колесов, Ю. Б.** Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 22.01.2007

**I. V. Leskovets, V. V. Beresnev**  
**Method of modeling of caterpillar machines**  
Belarusian-Russian University

In clause approaches to modeling complex systems are considered. The approach to modeling caterpillar machines which is constructed on development of the specialized software consisting of several modules, directed on creation imitating moles various elements of the machine on the basis of in advance developed methods is offered.