

УДК 621.73; 621.01

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Телегин В.В., Коробов С.А.

*ФБГОУ ВПО «Липецкий Государственный Технический Университет»,
Липецк, e-mail: vv.telegin@yandex.ru*

Создание конструкций надёжных, высокопроизводительных машин невозможно без теоретической оценки динамических процессов, возникающих при их работе вследствие высоких скоростей движения звеньев механизмов этих машин и резком изменении нагрузок при завершении технологических операций. В статье рассматриваются вопросы автоматизации построения имитационных моделей механических систем на основе методов объектно ориентированных технологий и их использования для решения задач исследования динамики. Процесс создания моделей механических систем и расчёт перемещений, скоростей, ускорений звеньев механизмов, нагрузок в них с учётом упруго-инерционных свойств, технологических и конструкционных сил, диссипации энергии и зазоров в кинематических парах выполняется на основе специально разработанного программного комплекса. Статья может быть полезна специалистам, занимающимся проектированием высокоскоростных циклических механизмов.

Ключевые слова: механизм, объектная модель, динамическая модель

CONSTRUCTION OF SIMULATION MODELS IN TASKS THE RESEARCH DYNAMICS OF MECHANICAL SYSTEMS

Telegin V.V., Korobov S.A.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: vv.telegin@yandex.ru

Creating reliable designs of high-performance machines is impossible without a theoretical estimation of dynamic processes occurring during their work due to the high velocities of links of the mechanism of these machines and the sudden change in load at the end of manufacturing operations. The article deals with the automation of building simulation models of mechanical systems based on the techniques of object-oriented technologies and their application for the purposes of research dynamics. The process of creating models of mechanical systems and calculation of displacements, velocities, accelerations links of mechanisms, load in them, taking into account the elastic-inertial properties, technological and structural forces, energy dissipation and clearances in kinematic pairs is performed using specially developed software. The article can be useful for specialists involved in the design of high-speed cyclic mechanisms.

Keywords: mechanism, the object model, the dynamic model

В контексте данной работы под имитационным моделированием будем понимать метод исследования, при котором реальный механизм с достаточно высокой степенью точности подменяется системой сосредоточенных масс, соединённых между собой кинематическими, упруго-диссипативными, в общем случае нелинейными и допускающими разрывы связями – динамической моделью и её математическим описанием (математической моделью). Экспериментальное исследование на основе таких моделей (численный эксперимент), даёт возможность сделать выводы о степени надёжности, работоспособности механизма при заданных режимах его эксплуатации, а также определить оптимальные параметры этих режимов. Движение конечной системы масс, на которую наложены идеальные, стационарные, голономные связи, может быть описано системами нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка – математическая модель. Для составления таких систем часто используют особую форму уравнения Лагранжа второго рода с «лишними» координатами [1, 4].

Для реализации численного решения исходные дифференциальные уравнения (математическая модель) аппроксимируются конечно-разностными схемами (например, метод Рунге-Кутты) – численная реализация математической модели, процесс вычисления которых программируется и осуществляется с помощью компьютера – компьютерная модель.

Таким образом, исследование динамики механической системы представляет собой:

- построение цепочки последовательных приближений: реальный механизм – динамическая модель – математическая модель – численная реализация математической модели – компьютерная модель;
- разработка метода количественного и качественного определения уровня динамических процессов, протекающих в механизме и влияющих на его надёжность и работоспособность под воздействием внешних факторов (скорость работы, технологические усилия) и изменении внутренних параметров (износ кинематических пар, конструкционные нагрузки, параметры регулировки).

Описанная выше методика динамического анализа механизмов известна [1, 4]. Однако, несмотря на постоянное совершенствование, связанное с увеличением числа масс (сложности) моделей, учётом зазоров в кинематических связях, уточнением характеристик упругих связей, параметров диссипации, сил трения, внешних нагрузок, широкого распространения на практике она не получила. Основные причины этого следующие:

- низкая степень точности и большая трудоёмкость расчёта параметров модели, в первую очередь, упруго-инерционных характеристик;

- большая трудоёмкость работ, связанных с разработкой динамической модели конкретного механизма, её математического описания и программной реализации;

- невозможность оценки достоверности полученных результатов без проведения экспериментальных исследований уже готового механизма.

Методика анализа динамических процессов в механизмах разработана автором с целью снижения трудоёмкости динамических исследований механизмов и повышения их достоверности. В её основе лежат методы компонентного моделирования и объектно ориентированных технологий [2, 5, 8], а также методы твердотельного моделирования [3, 4]. Практической реализацией методики является комплекс программ, объединённых в единую систему

dam (динамический анализ механизмов) [5–7], позволяющий автоматизировать процесс построения имитационной модели механизма и выполнить его динамический анализ.

Будем рассматривать любой механизм как совокупность некоторых элементов, соединённых между собой различного рода связями. Элемент – это отдельно взятая деталь механизма, какой-то её фрагмент или, наоборот, сразу несколько деталей. Такое определение элемента соответствует понятию объект, – одному из базовых в теории компонентного моделирования сложных динамических систем и объектно ориентированных технологий [2, 5, 8].

Сопоставим каждый элемент какого-либо механизма, например, переноса холодноштамповочного автомата (ХША) АВ1818 (рис. 1), с объектом, согласно данному выше определению. Любые процессы в таком объекте, могут моделироваться каким угодно образом и, в соответствии с принципами инкапсуляции и полиморфизма, на данном этапе их природа и описание, математическое, программное или физическое, не рассматривается.

Такой подход представляет интерес как при решении задач, связанных с разработкой динамических и математических моделей механизмов [1, 4], так и, что особенно существенно, их программных реализаций при дальнейшей компьютерной обработке [6, 7].

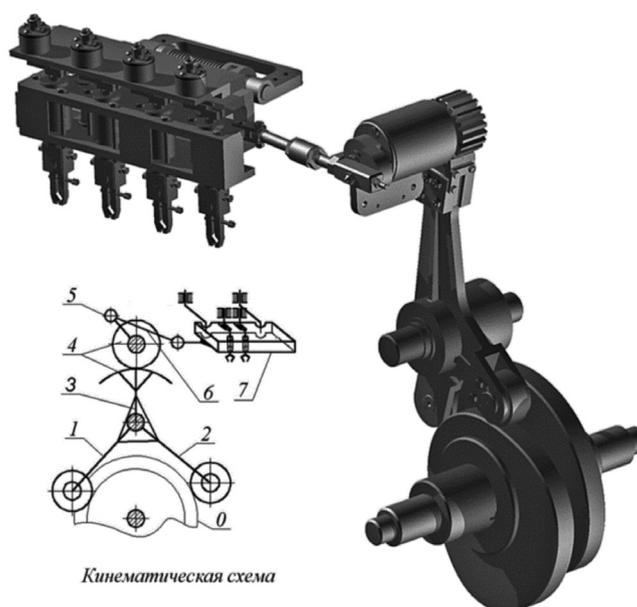


Рис. 1. Механизм переноса холодноштамповочного автомата (твердотельная модель и кинематическая схема): 0 – блок кулачков, 1, 2, 3 – рычаги прямого и обратного хода, 4 – зубчатая передача, 5 – кривошип, 6 – тяга и 7 – каретка переноса

Представим реальный механизм в виде соединённых между собой объектов. С каждым объектом свяжем пять наборов характеристик:

1. Свойства: массы, моменты инерции, жёсткости, коэффициенты диссипации, параметры передаточных функций и другие, определяющие объект как замкнутую систему.

2. Отклики на возмущения со стороны других объектов.

3. Силовые возмущения со стороны других объектов.

4. Входные параметры, среди которых могут быть кинематические и силовые.

5. Выходные параметры (кинематические, силовые и значения критериев оценки различного рода процессов, протекающих в объекте).

Свойства и отклики (пункты 1 и 2) – это величины, целиком зависящие от объекта. Причём первые – постоянные, не зависящие от внешних условий, вторые – зависимые от той среды, в которую помещён объект. Силовые возмущения и входные параметры (пункты 3 и 4) – окружающая объект среда. Выходные параметры (пункт 5) – это набор результирующих данных, позволяющих оценить процессы, протекающие в объекте, после размещения его в конкретной среде. Следует особо отметить, что набор объектов, представляющих механизм (объектное представление) и сам механизм полностью адекватны друг другу. Подмена реальности моделью осуществляется только на уровне объекта. То есть точность результатов динамических исследований определяется исключительно «доброкачественностью» тех объектов, которые в этих исследованиях используются.

Ещё одно уточнение: объект и модель объекта, как следует из вышеизложенного, – понятия различные. Однако при изложении дальнейшего материала термином «объект» будем обозначать его модель.

Объект, моделирующий механическую систему, которая приводится в движение через одно единственное входное звено и имеющий только одно выходное звено, изображён на рис. 2. Ему может соответствовать

одна какая-либо деталь (или её фрагмент) достаточно сложного механизма, например, нижнее плечо рычага прямого хода системы переноса ХША АВ1818 (рис. 1, поз. 1). Входной параметр в данном случае – угол поворота кулачка φ_0 , выходной – угол поворота рычага φ_1 . В то же время это может быть и более сложная механическая система – кулачковый механизм привода системы переноса (поз. 0, 1, 2), весь привод (детали, обозначенные на рис. 1 позициями с 0 по 7), или даже вся система переноса целиком.

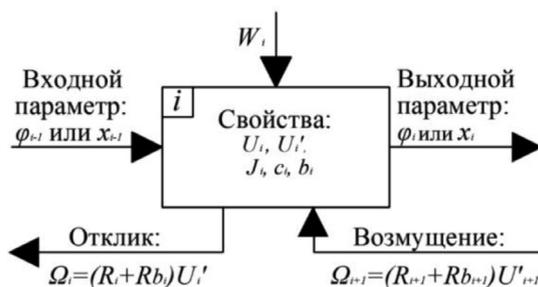


Рис. 2. Объект, моделирующий механическую систему с одним входным и одним выходным звеном

Входными параметрами объекта являются функция перемещения (углового или линейного) предшествующего ему объекта φ_{i-1} и внешние нагрузки W_i на этот объект (например, силы и моменты сил трения, конструкционные и технологические).

Выходной параметр соответственно – функция перемещения выходного звена. Свойства – набор констант, определяющих количественные характеристики модели, соответствующей данному объекту. Среди них, параметры функций положения и передаточных функций (для входного звена это U_i и U_i'), упруго-инерционные и диссипативные характеристики. Отклик, по существу выходной параметр, – воздействие сил упругости R_i и диссипации R_{b_i} в первом фрагменте входного звена, на объект предшествующий. Возмущение – это отклик со стороны следующего объекта (или следующих, если их несколько) на данный объект.

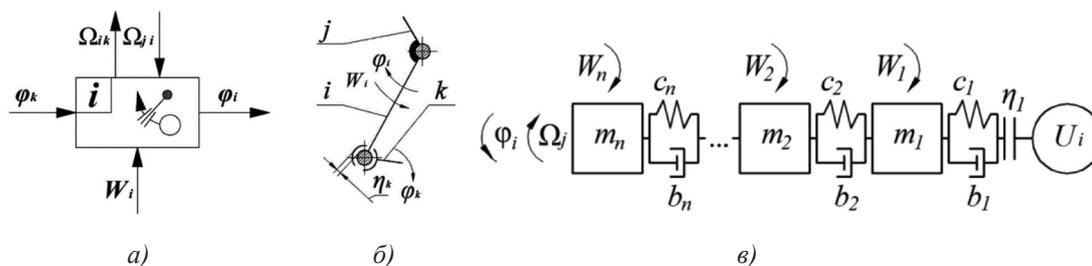


Рис. 3. Объект – вращающийся рычаг: а – обозначение на объектном представлении механизма, б – кинематическая схема, в – динамическая модель

Конкретным примером объекта, представленного на рис. 2, является, в частности, объект, именуемый в дальнейшем рычаг или качающийся рычаг (рис. 3), движение которого описывается n -массовой динамической моделью и соответственно системой n -нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Компьютерной (программной) реализацией этого объекта будет итерационная схема решения системы уравнений, полученная с помощью одного из многочисленных методов их численного интегрирования.

При построении объектной модели механизма и соответственно математической и программной её реализации в общем случае приходится решать следующие задачи:

1. Разработка, если это необходимо, новых объектов и добавление их к базе объектов уже, существующих.
2. Подготовка данных о свойствах объектов.
3. Выбор из базы существующих объектов тех, которые необходимы для построения объектно ориентированного представления механизма, и создание этого представления.

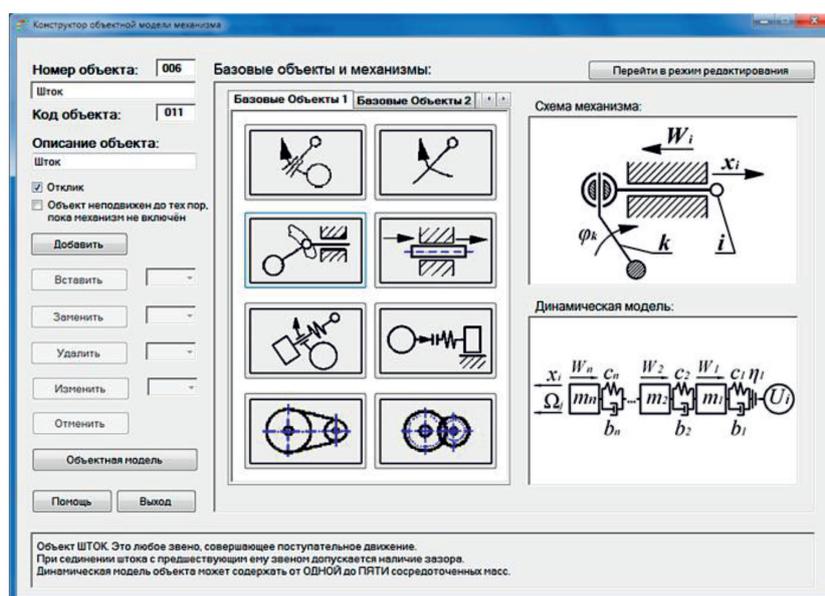


Рис. 4. Конструктор объектной модели

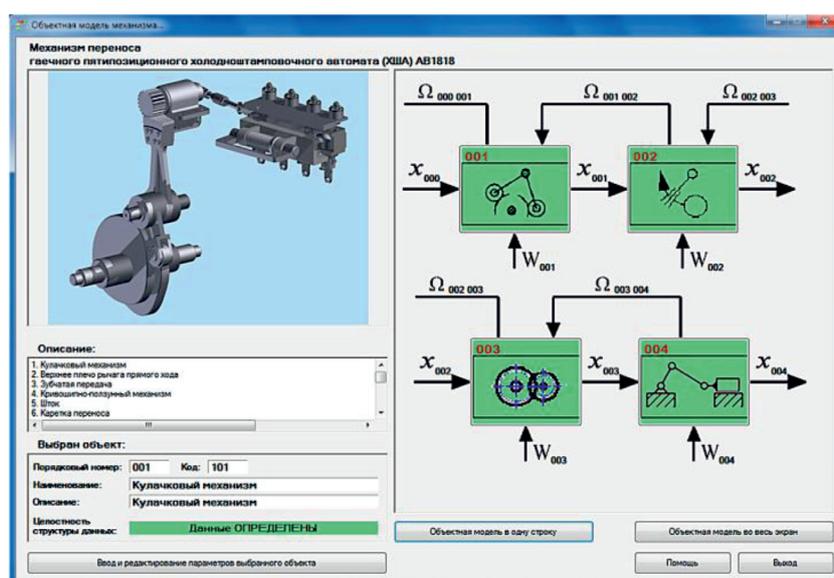
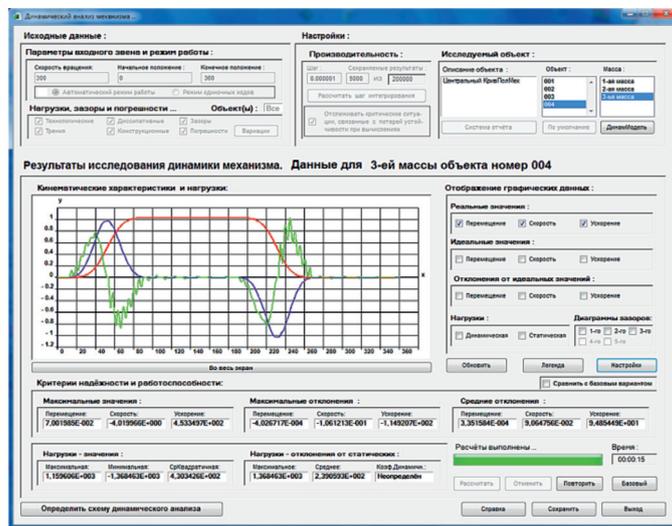


Рис. 5. Объектная модель

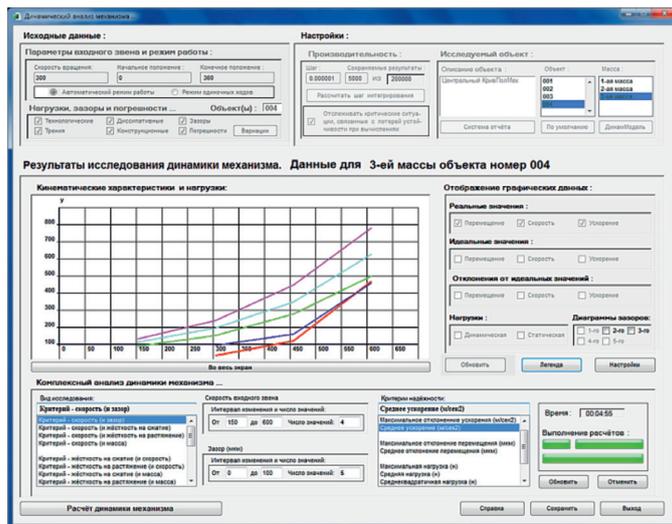
Построение объектно ориентированной модели из уже готовых объектов осуществляется путём их последовательного соединения в одну схему. В системе *dam* работа по созданию объектной модели осуществляется в интерактивном режиме (рис. 4, 5). На данном этапе параллельно с объектным представлением автоматического механизма создаётся и его математическая модель [5].

На рис. 6 показано основное окно определения параметров имитационного моделирования механизмов и вывода результатов расчётов. Здесь определяется исследуемый объект, на рис. 6 кривошипно-ползунный механизм перемещения каретки

переноса, скорость работы механизма, режим его работы (одиночных ходов или автоматический), начальное и конечное положение входного звена. Значения данных объектов: количество масс, кинематические, упруго-инерционные и диссипативные характеристики, нагрузки, параметры зазоров и погрешности изготовления назначаются при разработке объектной модели механизма. Однако, что является несомненным достоинством системы *dam*, некоторые из этих данных (зазоры, погрешности изготовления, силы диссипации, трения, конструкционные нагрузки и технологические усилия) могут быть исключены из процесса моделирования.



а)



б)

Рис. 6. Исследования динамики механизма в системе *dam*: а – расчёт динамических характеристик, б – анализ работоспособности механизма в зависимости от скорости его работы и степени износа кинематических пар

При построении стратегий имитационного моделирования имеется возможность изменить значения большинства параметров объектов. Оценка работоспособности исследуемого механизма может быть выполнена на основании двух категорий показателей, определяющих уровень и характер динамических процессов, протекающих при имитации работы механизма при заданных условиях: графического отображения данных и расчётных значений ряда критериев (рис. 6, а).

Процесс построения схем исследования надёжности и работоспособности механизма может быть автоматизирован путём использования уже готовых решений. При реализации каждого из них имеется возможность оценить работоспособность механизма по десяти критериям.

Результат применения одной из таких схем: построение функции изменения среднего значения величины ускорения каретки переноса в зависимости от скорости работы механизма и величины зазоров (степени износа) в кинематических парах – показан на рис. 6, б.

Предложенная в работе методика имитации динамических процессов, протекающих в механических системах (механизмах), позволяет решить следующие задачи:

1. Автоматизировать процесс создания компьютерных моделей механизмов, имитирующих их работу при различных условиях эксплуатации и различных вариантах конструкционных исполнений деталей, их соединений и точности изготовления.

2. Обеспечить на этапе построения объектной модели механической системы и её компьютерной реализации требуемую адекватность реальному механизму и соответственно точность решаемых на её основе задач.

3. Выполнить на этапе проектирования механизма оценку его надёжности и работоспособности на основе данных, характеризующих уровень динамических процессов в его элементах, и определить пути оптимизации конструкции и режимов эксплуатации механизма.

Список литературы

1. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 592 с.
2. Беньковский Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.

3. Телегин В.В. Анализ динамики быстроходных машин-автоматов прессового производства на основе их твёрдотельных моделей // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ, 2004. – Вып. 1. – С. 197–206.

4. Телегин В.В. Динамика механизмов многопозиционных холодноштамповочных автоматов [Текст]: монография / В.В. Телегин. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 204 с.

5. Телегин В.В. Объектно ориентированный подход и его компьютерная реализация в задачах исследования динамики механизмов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, №4 (3). – С. 623–628.

6. Телегин В.В. Разработка и тестирование объекта системы динамического анализа механизмов (dam) // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4 (4). – С. 1115–1118.

7. Телегин В.В. Система динамического анализа механизмов (dam) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012610572 от 10.01.2012. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (РОСПАТЕНТ).

8. Rumbaugh J. et al. Object-Oriented Modeling and Design. – Prentice Hall, 1991. – 500 p.

References

1. Vul'fson I.I. Kolebanija mashin s mehanizmami ciklovogo dejstvija. – L.: Mashinostroenie, 1990. 592 p.

2. Ben'kovskij E.S., Kolesov Ju.B., Senichenkov Ju.B. Prakticheskoe modelirovanie dinamicheskikh sistem. – SPb.: BHV-Peterburg, 2002. 464 p.

3. Telegin V.V. Analiz dinamiki bystrohodnyh mashin-avtomatov pressovogo proizvodstva na osnove ih tvjordotel'nyh modelej // Izvestija TulGU. Serija. Mehanika deformiruемого tvjordogo tela i obrabotka metallov davleniem. – Tula: TulGU, 2004, Vyp. 1, pp. 197–206.

4. Telegin V.V. Dinamika mehanizmov mnogopozicionnyh holodnoshtampovochnyh avtomatov [Tekst]: monografija / V.V. Telegin. Lipeck: LGTU, 2006. 204 p.

5. Telegin V.V. Ob'ektno-orientirovannyj podhod i ego komp'yuternaja realizacija v zadachah issledovaniya dinamiki mehanizmov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2010. T. 12, no. 4 (3). pp. 623–628.

6. Telegin V.V. Razrabotka i testirovanie ob'ekta sistemy dinamicheskogo analiza mehanizmov (dam) // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2011. T. 13, no. 4 (4). pp. 1115–1118.

7. Telegin V.V. Sistema dinamicheskogo analiza mehanizmov (dam) // Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM №2012610572 ot 10.01.2012. Federal'naja sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam (ROSPATENT).

8. Rumbaugh J. et al. Object-Oriented Modeling and Design. – Prentice Hall, 1991. 500 p.

Рецензенты:

Корнеев А.М., д.т.н., директор института машиностроения, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк;

Лебедев С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологий сварки и покрытий Липецкого государственного технического университета, г. Липецк.

Работа поступила в редакцию 29.12.2014.