

УДК 517.977.5:004.49+519.857:004.49

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ДИСЦИПЛИНЕ «СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ» БАКАЛАВРОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ «КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»

ЕРШОВА Н. М.¹, *д-р техн. наук, проф.*,
ВЕЛЬМАГИНА Н. А.², *канд. фіз.-мат. наук.*

¹Кафедра «Прикладная математика и информационные технологии», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днипро, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-10, email: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557

²Кафедра «Прикладная математика и информационные технологии», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днипро, 49600, Украина, тел. +38 (095) 106-56-13, email: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Аннотация. *Цель статьи* – показать возможности системы моделирования МВТУ 3.7 при исследовании переходных процессов сложных динамических систем и целесообразность ее использования в учебном процессе. **Методика.** Компьютерная техника и информационные технологии – основные инструменты работы современного ИТ - специалиста, поэтому качественная подготовка студентов в этой области имеет большое значение в общей системе подготовки специалистов и во многом определяет степень усвоения материала на старших курсах. Отсутствие в современных алгоритмических языках программирования библиотек стандартных программ решения наиболее часто встречающихся инженерных задач очень затрудняет процесс создания программных продуктов для исследования сложных динамических систем. На помощь приходят системы моделирования, математической базой которых является теория автоматического управления. Существуют единые принципы их создания, в основу которых заложено описание структурных схем – в графическом изображении математической модели. Система МВТУ 3.7 позволяет моделировать переходные процессы, исследовать устойчивость и выполнять синтез параметров колебательных процессов различных технических устройств: механических, гидравлических, теплотехнических, электротехнических и др., в том числе средств и систем автоматики. Ограниченная версия применима к техническим устройствам с 15 степенями свободы. В системе моделирования МВТУ 3.7 основная роль отводится графическому редактору, с его помощью на экране дисплея создается схема моделирования по структурной схеме исследуемой системы. Блоки структурной схемы выбираются из графической базы данных с помощью мыши. Графическая база данных находится на экране дисплея рядом с рабочим полем. После создания схемы моделирования производится назначение параметров функциональных блоков, выбор метода интегрирования и назначение параметров интегрирования. Затем осуществляется запуск процесса моделирования. В работах [1; 2; 7; 8] приведены основные сведения по математическому моделированию систем автоматического регулирования (САР). Математические модели колебательных процессов колесных машин имеют свою специфику создания. В работах [3; 4] рассмотрен процесс создания математических моделей колебательных процессов автомобилей для различных расчетных схем. Возможности системы моделирования МВТУ 3.7 при исследовании свободных и вынужденных колебаний, анализе устойчивости движения по развернутой структурной схеме простейшей модели рассмотрены в публикации [4] и реализованы в лабораторных работах дисциплины «Современная теория управления динамическими системами» учебного плана бакалавров специальности «Компьютерные науки». Получены переходные характеристики, фазовые портреты, графики свободных и вынужденных колебаний. Развернутая структурная схема механической системы с двумя степенями свободы очень сложна, но позволяет построить только одну фазовую траекторию. Следовательно, оценку качества сложных динамических систем следует проводить по укрупненной структурной схеме путем анализа переходных характеристик. В этом случае блоки схемы имеют сложные передаточные функции, для реализации которых в библиотеке динамических звеньев имеется блок общего вида. Все параметры блока имеют размерность секунда. Возникает проблема перехода от математической модели исследуемой системы к математической модели для построения укрупненной структурной схемы и преобразования передаточных функций к передаточной функции динамического звена общего вида. **Результаты.** Предложена методика исследования переходных процессов сложных динамических систем в системе моделирования МВТУ 3.7 путем создания укрупненных структурных схем и использования динамического звена общего вида. **Научная новизна.** Полученные в результате моделирования переходные характеристики всех динамических звеньев позволяют оценить качество сложной системы и проверить устойчивость колебательных процессов. **Практическая значимость.** Предлагаемая методика удобна в применении и позволяет получать не только графики процессов, но и их табличные значения. Рекомендуется для использования в дисциплине «Теория компьютерного проектирования сложных объектов и систем» учебного плана магистров специальности «Компьютерные науки».

Ключевые слова: структурная схема; схема моделирования; динамическое звено; передаточная функция; переходная характеристика; колебательный процесс; устойчивость; математическая модель

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ДИСЦИПЛІНІ «СУЧАСНА ТЕОРІЯ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ» БАКАЛАВРІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ»

ЄРШОВА Н. М.¹, д-р техн. наук, проф.,
ВЕЛЬМАГІНА Н. О.², канд. физ.-мат. наук.

¹Кафедра «Прикладна математика та інформаційні технології», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-10, email: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557

²Кафедра «Прикладна математика та інформаційні технології», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (095) 106-56-13, email: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Анотація. *Мета статті* – показати можливості системи моделювання МВТУ 3.7 для дослідження перехідних процесів складних динамічних систем і доцільність її використання в навчальному процесі. **Методика.** Комп'ютерна техніка й інформаційні технології – основні інструменти роботи сучасного ІТ-фахівця, тому якісна підготовка студентів у цій галузі має велике значення в загальній системі підготовки фахівців і багато в чому визначає міру засвоєння матеріалу на старших курсах. Відсутність у сучасних алгоритмічних мовах програмування бібліотек стандартних програм розв'язання інженерних задач, що найчастіше зустрічаються, дуже утруднює процес створення програмних продуктів для дослідження складних динамічних систем. На допомогу приходять системи моделювання, математичною базою яких складає теорія автоматичного управління. Існують єдині принципи їх створення, в основу яких закладений опис структурних схем – у графічному зображенні математичної моделі. Система моделювання МВТУ 3.7 дозволяє моделювати перехідні процеси, досліджувати стійкість і виконувати синтез параметрів коливальних процесів різних технічних пристроїв: механічних, гідравлічних, теплотехнічних, електротехнічних та ін., у тому числі засобів і систем автоматики. Обмежена версія застосована до технічних пристроїв з 15 степенями свободи. У системі моделювання МВТУ 3.7 основна роль відводиться графічному редактору, з його допомогою на екрані дисплея створюється схема моделювання за структурною схемою досліджуваної системи. Блоки структурної схеми вибираються з графічної бази даних за допомогою миші. Графічна база даних розміщена на екрані дисплея поряд із робочим полем. Після створення схеми моделювання робиться призначення параметрів функціональних блоків, вибір методу інтеграції і призначення параметрів інтеграції. Потім здійснюється запуск процесу моделювання. У працях [1; 2; 7; 8] наведено основні відомості стосовно математичного моделювання систем автоматичного регулювання (САР). Математичні моделі коливальних процесів колісних машин мають свою специфіку створення. У працях [3; 4] розглянуто процес створення математичних моделей коливальних процесів автомобілів для різних розрахункових схем. Можливості системи моделювання МВТУ 3.7 для дослідження вільних і вимушених коливань, аналізу стійкості руху за розгорнутою структурною схемою простої моделі розглянуті в публікації [4] і реалізовані в лабораторних роботах дисципліни «Сучасна теорія управління динамічними системами» навчального плану бакалаврів спеціальності «Комп'ютерні науки». Отримано перехідні характеристики, фазові портрети, графіки вільних і вимушених коливань. Розгорнута структурна схема механічної системи з двома степенями вільності дуже складна, але дозволяє побудувати тільки одну фазову траєкторію. Отже, оцінювання якості складних динамічних систем слід проводити за укрупненою структурною схемою шляхом аналізу перехідних характеристик. У цьому випадку блоки схеми мають складні передатні функції, для реалізації яких у бібліотеці динамічних ланок є блок загального вигляду. Усі параметри блока мають розмірність секунда. Виникає проблема переходу від математичної моделі досліджуваної системи до математичної моделі для побудови укрупненої структурної схеми і перетворення передатних функцій до передатної функції динамічної ланки загального вигляду. **Результати.** Запропоновано методику дослідження перехідних процесів складних динамічних систем у системі моделювання МВТУ 3.7 шляхом створення укрупнених структурних схем і використання динамічної ланки загального вигляду. **Наукова новизна.** Отримані в результаті моделювання перехідні характеристики усіх динамічних ланок дозволяють оцінити якість складної системи і перевірити стійкість коливальних процесів. **Практична значущість.** Пропонована методика зручна в застосуванні і дозволяє отримувати не лише графіки процесів, а і їх табличні значення. Рекомендується для використання в дисципліні «Теорія комп'ютерного проектування складних об'єктів і систем» навчального плану магістрів спеціальності «Комп'ютерні науки».

Ключові слова: структурна схема; схема моделювання; динамічна ланка; передатна функція; перехідна характеристика; коливальний процес; стійкість; математична модель

APPLICATION OF MODELLING SYSTEMS IN THE DISCIPLINE «MODERN THEORY OF THE DYNAMIC SYSTEMS CONTROL» OF BACHELOR DEGREE FOR THE «COMPUTER SCIENCES» SPECIALTY

ERSHOVA N. M.¹, D.Sc. (Tech), Prof.,

VELMAHINA N. O.^{2*}, Cand. Sc. (Phys.-Math.)

¹Applied Mathematics department. Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. 24-a Chernishevskogo st. Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(0562)46-98-10, email: prmat@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1726-0557

²Applied Mathematics department. Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. 24-a Chernishevskogo st. Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (095) 106-56-13, email: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Annotation. Purpose of the article. To present the capabilities of the MVTU 3.7 simulation system while the transient processes studying of complex dynamic systems and the appropriateness of its using in the learning process. **Methodology of the research.** Computer technology and information technologies are the main tools of the modern IT specialist, therefore, the qualitative preparation of students in this field has a great importance in the general system of specialists training and largely determines the material mastering degree at the senior courses. The absence of standard programs libraries for solving the most frequently encountered engineering problems in modern algorithmic programming languages makes the creating software products process for research of complex dynamic systems very difficult. For help come systems of modeling, mathematical base of which is the theory of automatic control. There are unified principles for their creation, which are based on the description of structural schemes, that is the graphical representation of a mathematical model. The MVTU 3.7 simulation system allows you to model transient processes, investigate stability and perform the synthesis of the parameters of the oscillatory processes of various technical devices: mechanical, hydraulic, heat engineering, electrotechnical, etc., including means and automation systems. The restricted version is applicable to technical devices with 15 degrees of freedom. In the MVTU 3.7 simulation system, the main role is assigned to the graphic editor, with its help a simulation scheme is created on the display screen according to the structural scheme of the research system. Block structures are selected from the graphics database using the mouse. The graphical database is located on the display screen next to the working field. After the simulation scheme creating the function block parameters are assigned, the integration method is selected and the integration parameters are assigned. Then, the simulation process is started. In the work [1, 2,7,8] the basic data on mathematical modeling of the automatic regulation systems (ARS) are given. Mathematical models of oscillatory processes of wheeled vehicles have their own specifics of creation. In works [3,4] the process of mathematical models creating of the machines oscillatory processes for various calculation schemes is considered. In the work [4] the possibilities of the MVTU 3.7 simulation system in free and forced oscillations studying, analyzing the motion stability along a detailed structural scheme of the simplest model is considered and in the laboratory works of the discipline "Modern Theory of Control of Dynamic Systems" of the baccalaureates curriculum of the specialty "Computer science" is implemented. Transient characteristics, phase portraits and graphs of free and of forced oscillations are obtained. The unfolded structural diagram of a mechanical system with two degrees of freedom is very complicated, but it allows to construct only one phase trajectory. Therefore, an assessment of the complex dynamic systems quality should be carried out on an enlarged structural scheme by the transient characteristics analyzing. In this case, the circuit blocks have complex transfer functions for the implementation of which there is a general view on the dynamic links library. All block parameters have the dimension of a second. It appears the problem a of the transition from the mathematical model of the research system to the mathematical model for constructing an enlarged structural scheme and the transformation of transfer functions to the transfer function of the dynamic link of a general type. **Results.** A technique for research of the transient processes of complex dynamical systems in the MVTU 3.7 simulation system is proposed by creating enlarged structural schemes and using a general-type dynamic link. **Scientific novelty.** The received transient characteristics of all dynamic links resulting from the simulation allow us to evaluate the quality of a complex system and verify the stability of oscillatory processes. **Practical significance.** The proposed technique is convenient in appliance and allows you not only to get the processes graphs, but also their tabular values. It is recommended for using in the "The theory of computer design of complex objects and systems" discipline of the masters curriculum of the specialty "Computer Science".

Keywords: structural scheme; simulation scheme; dynamic link; transfer function; transient response; oscillatory process; stability; mathematical model

Постановка проблеми. Исследование динамических процессов в сложных системах аналитическими методами связано с большими теоретическими и вычислительными трудностями, поэтому одним из основных методов исследования

является метод математического моделирования. Моделирование на современном этапе развивается наиболее динамично, что вызвано интенсивным развитием систем моделирования. Системы моделирования имеют специальный язык,

который понятен для пользователей, не владеющих алгоритмическими языками, и содержат в своем составе язык моделирования, программную среду и реализуются на компьютере.

Математической базой всех систем моделирования является теория автоматического управления, поэтому существуют единые принципы их создания, в основу которых заложено описание структурных схем – в графическом изображении математической модели. Отличие есть в языке моделирования, содержании библиотек входного языка, методах интегрирования и оптимизации, структуре операторов описания функциональных блоков структурных схем.

Основным разработчиком систем моделирования является Московский государственный технический университет им. Баумана (МГТУ). В его стенах созданы системы: моделирования и оптимизации динамических систем (МОДС), анализа и параметрического синтеза линейных систем (ПАЛС), моделирования динамических систем на персональном компьютере (МДС/ПК), проектирования динамических систем (ПДС и ПРОДИС), моделирование в технических устройствах (МВТУ) [1; 2].

Система МВТУ 3.7 позволяет моделировать переходные процессы, исследовать устойчивость и выполнять синтез параметров колебательных процессов различных технических устройств: механических, гидравлических, теплотехнических, электротехнических и др., в том числе средств и систем автоматики. Ограниченная версия применима к техническим устройствам с 15 степенями свободы.

В системе моделирования МВТУ 3.7 основная роль отводится графическому редактору, с его помощью на экране дисплея создается схема моделирования по структурной схеме исследуемой системы. Блоки структурной схемы выбираются из графической базы данных с помощью мыши. Графическая база данных находится на экране дисплея рядом с рабочим полем. После создания схемы моделирования

производится назначение параметров функциональных блоков, выбор метода интегрирования и назначение параметров интегрирования. Затем осуществляется запуск процесса моделирования.

Выделение нерешенной проблемы. Для простых систем (с одной степенью свободы) по развернутой структурной схеме легко получаются переходные характеристики, фазовые траектории, графики свободных и вынужденных колебаний. Развернутая структурная схема механической системы с двумя степенями свободы очень сложна, но позволяет построить только одну фазовую траекторию. Следовательно, оценку качества сложных динамических систем следует проводить по укрупненной структурной схеме путем анализа переходных характеристик. В этом случае блоки схемы имеют сложные передаточные функции, для реализации которых в библиотеке динамических звеньев имеется блок общего вида. Все параметры блока имеют размерность «секунда». Возникает проблема перехода от математической модели исследуемой системы к математической модели для построения укрупненной структурной схемы и преобразования передаточных функций к передаточной функции динамического звена общего вида.

Формулирование цели работы. В работе [1] приведены основные сведения по математическому моделированию систем автоматического регулирования (САР) в системе моделирования МВТУ 3.7. Математические модели колесных машин имеют свою специфику создания. Цель работы - разработать методику исследования переходных процессов в сложных динамических системах.

Изложение основного материала. Математическая модель колебательного процесса системы «автомобиль–шина–дорога» составляется по уравнениям Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} = Q_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где K, P – соответственно кинетическая и потенциальная энергия; F функция рассеивания (диссипативная функция); q, \dot{q} – соответственно обобщенная координата и обобщенная скорость; Q_j – обобщенная внешняя сила, соответствующая обобщенной координате; n – число степеней свободы, равное для рассматриваемой схемы (рис. 1) числу сосредоточенных масс.

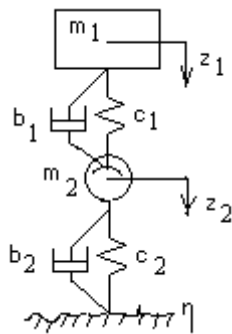


Рис. 1. Расчетная схема

На рисунке 1 обозначено: m_1, m_2 – соответственно масса кузова с пассажирами или грузом и масса частей автомобиля, опирающихся на шины; \tilde{n}_1, \tilde{n}_2 – жесткость подвески и жесткость шин; b_1, b_2 – коэффициент сопротивления гасителей колебаний, установленных в подвеске, и коэффициент демпфирования шин.

При поступательном перемещении масс вдоль вертикальной оси $q_j = z_j; \dot{q}_j = \dot{z}_j; Q_j = 0$. Для рассматриваемой схемы деформация пружины подвески $\Delta_1 = z_1 - z_2$, деформация шин $\Delta_2 = z_2 - \eta$, скорость деформации $\dot{\Delta}_1 = \dot{z}_1 - \dot{z}_2$, $\dot{\Delta}_2 = \dot{z}_2 - \dot{\eta}$. Запишем выражения для кинетической, потенциальной энергий и функции рассеивания.

$$K = \frac{m_1 \dot{z}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{z}_2^2}{2};$$

$$P = \frac{c_1 \Delta_1^2}{2} + \frac{c_2 \Delta_2^2}{2} = c_1 \frac{(z_1 - z_2)^2}{2} + c_2 \frac{(z_2 - \eta)^2}{2};$$

$$F = \frac{b_1 \dot{\Delta}_1^2}{2} + \frac{b_2 \dot{\Delta}_2^2}{2} = b_1 \frac{(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2}{2} + b_2 \frac{(\dot{z}_2 - \dot{\eta})^2}{2}$$

После выполнения необходимых операций получим:

$$m_1 \ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1(z_1 - z_2) = 0;$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + b_2 \dot{z}_2 + c_2 z_2 - b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1(z_1 - z_2) = b_2 \dot{\eta} + c_2 \eta. \quad (2)$$

Уравнения (2) представляют собой математическую модель колебательного процесса системы «автомобиль–дорога» с учетом упругости шин. По этой модели можно построить развернутую структурную схему и в системе моделирования МВТУ 3.7 получить графики ускорений \ddot{z}_1, \ddot{z}_2 , скорости \dot{z}_2 и перемещения z_2 , но нельзя получить графики перемещения z_1 и скорости \dot{z}_1 , т. е. нельзя построить фазовую траекторию $\dot{z}_1 = f(z_1)$.

Построим укрупненную структурную схему. Для этого запишем систему уравнений (2) в операторной форме:

$$(m_1 p^2 + b_1 p + c_1)z_1(t) = (b_1 p + c_1)z_2(t);$$

$$(m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2))z_2(t) = (b_1 p + c_1)z_1(t) + (b_2 p + c_2)\eta(t). \quad (3)$$

Разделим обе части системы уравнений (3) на алгебраические многочлены левых частей

$$z_1(t) = W_1(p)z_2(t);$$

$$z_2(t) = W_2(p)z_1(t) + W_3(p)\eta(t), \quad (4)$$

где $W_1(p) = \frac{b_1 p + c_1}{m_1 p^2 + b_1 p + c_1}$ – передаточная функция от массы частей автомобиля, опирающихся на шины, к вертикальным перемещениям массы кузова;

$W_2(p) = \frac{b_1 p + c_1}{m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2)}$ – передаточная функция от массы кузова к вертикальным перемещениям массы частей автомобиля, опирающихся на шины;

$W_3(p) = \frac{b_2 p + c_2}{m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2)}$ – передаточная функция от дороги к вертикальным перемещениям массы частей автомобиля, опирающейся на шины.

По уравнениям (4) строим укрупненную структурную схему (рис. 2).

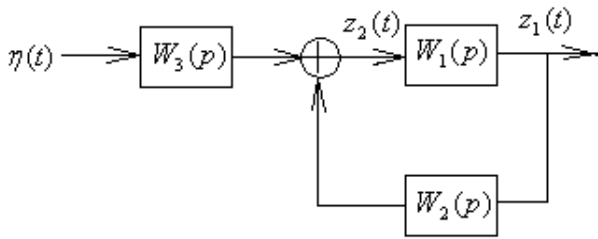


Рис. 2. Укрупненна структурна схема

В библиотеке системы моделирования МВТУ 3.7 имеется динамическое звено общего вида (рис. 3).

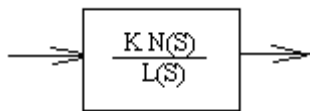


Рис. 3. Динамическое звено общего вида

Передаточная функция динамического звена общего вида записывается следующим образом:

$$W(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + 5 + b_ms^m}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + 5 + a_ns^n}, m \leq n, a_n \neq 0.$$

Размерность коэффициентов a_i, b_i передаточной функции – секунда, поэтому исходные передаточные функции нужно преобразовать к соответствующему виду путем деления числителя и знаменателя на коэффициент знаменателя при p^0 , т. е.

$$W_1(p) = \frac{\frac{b_1}{c_1} p + 1}{\frac{m_1}{c_1} p^2 + \frac{b_1}{c_1} p + 1};$$

$$W_3(p) = \frac{\frac{b_2}{c_1 + c_2} p + \frac{c_2}{c_1 + c_2}}{\frac{m_2}{c_1 + c_2} p^2 + \frac{b_1 + b_2}{c_1 + c_2} p + 1}.$$

Технология работы в системе моделирования МВТУ 3.7. Создание схемы моделирования подробно изложено в работе [4]. На рисунке 4 представлена схема моделирования.

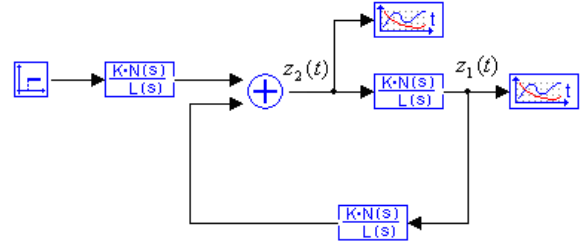


Рис. 4. Укрупненна схема моделирования

Исследуем переходной процесс автомобиля Мерседес 220, исходные данные которого:

$$m_1 = 1,649 \text{ т}; m_2 = 0,17 \text{ т}; b_1 = 5,9 \text{ кНс/м}; b_2 = 4,24 \text{ кНс/м}; c_1 = 85 \text{ кН/м}; c_2 = 770 \text{ кН/м}.$$

Значения коэффициентов передаточных функций приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Приведенные коэффициенты передаточных функций

	$W_1(p)$	$W_2(p)$	$W_3(p)$
a_0	1	1	1
a_1	0,0694	0,01186	0,01186
a_2	0,0194	0,0002	0,0002
b_0	1	0,0994	0,9006
b_1	0,0694	0,0069	0,004959

Переходные характеристики получаем при ступенчатом воздействии амплитудой 0,01 м. На рисунке 5 представлена переходная характеристика центра масс кузова автомобиля, на рисунке 6 – шины. Следовательно, в системе наблюдается затухающий колебательный процесс с параметрами: периоды $T_1 = 0,884 \text{ с}; T_2 = 0,193 \text{ с};$ частоты $\nu_1 = 7,104 \text{ н}^{-1}; \nu_2 = 32,555 \text{ н}^{-1}.$

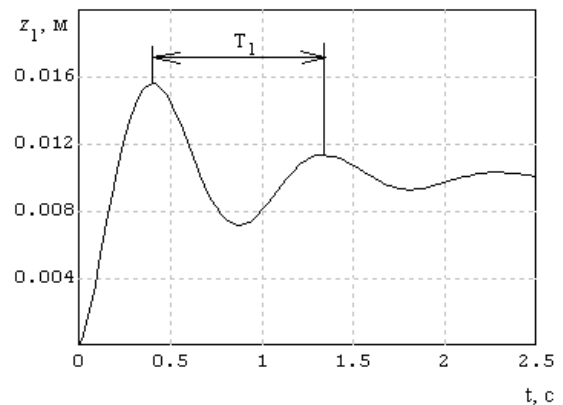


Рис. 5. Переходная характеристика центра масс кузова автомобиля

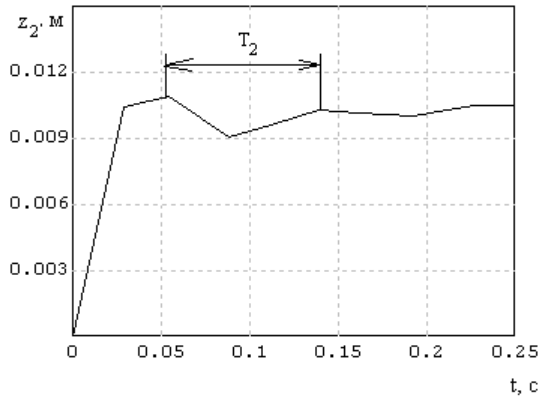


Рис. 6. Переходная характеристика шины

Рассмотрим моделирование колебаний системы «водитель–автомобиль–шина–дорога» [4], расчетная схема которой представлена на рисунке 7.

Для рассматриваемой схемы деформация пружины подвески кресла $\Delta_1 = z_1 - z_2$, деформация пружины подвески автомобиля $\Delta_2 = z_2 - z_3$, деформация шин $\Delta_3 = z_3 - \eta$. Запишем выражения для кинетической, потенциальной энергий и функции рассеивания:

$$K = \frac{m_1 \dot{z}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{z}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{z}_3^2}{2};$$

$$P = c_1 \frac{(z_1 - z_2)^2}{2} + c_2 \frac{(z_2 - z_3)^2}{2} + c_3 \frac{(z_3 - \eta)^2}{2};$$

$$F = b_1 \frac{(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2}{2} + b_2 \frac{(\dot{z}_2 - \dot{z}_3)^2}{2} + b_3 \frac{(\dot{z}_3 - \dot{\eta})^2}{2}.$$

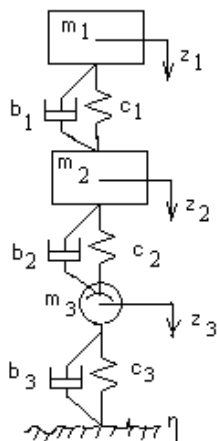


Рис. 7. Расчетная схема

Математическая модель колебательного процесса:

$$m_1 \ddot{z}_1 + b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1(z_1 - z_2) = 0;$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + b_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + c_2(z_2 - z_3) - b_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1(z_1 - z_2) = 0;$$

$$m_3 \ddot{z}_3 + b_3 \dot{z}_3 + c_3 z_3 - b_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) - c_2(z_2 - z_3) = b_3 \dot{\eta} + c_3 \eta. \quad (5)$$

Математическая модель колебательного процесса в операторной форме:

$$(m_1 p^2 + b_1 p + c_1)z_1(t) = (b_1 p + c_1)z_2(t);$$

$$(m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2))z_2(t) = (b_1 p + c_1)z_1(t) + (b_2 p + c_2)z_3(t);$$

$$(m_3 p^2 + (b_2 + b_3)p + (c_2 + c_3))z_3(t) = (b_2 p + c_2)z_2(t) + (b_3 p + c_3)\eta(t). \quad (6)$$

Разделим обе части системы уравнений (6) на алгебраические многочлены левых частей

$$z_1(t) = W_1(p)z_2(t);$$

$$z_2(t) = W_2(p)z_1(t) + W_3(p)z_3(t);$$

$$z_3(t) = W_4(p)z_2(t) + W_5(p)\eta(t), \quad (7)$$

где $W_1(p) = \frac{b_1 p + c_1}{m_1 p^2 + b_1 p + c_1}$ – передаточная

функция от массы кузова к вертикальным перемещениям массы кресла с водителем;

$W_2(p) = \frac{b_1 p + c_1}{m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2)}$ – передаточная

функция от массы кресла с водителем к вертикальным перемещениям массы кузова;

$W_3(p) = \frac{b_2 p + c_2}{m_2 p^2 + (b_1 + b_2)p + (c_1 + c_2)}$ – передаточная

функция от массы частей автомобиля, опирающихся на шины, к вертикальным перемещениям массы кузова;

$W_4(p) = \frac{b_2 p + c_2}{m_3 p^2 + (b_2 + b_3)p + (c_2 + c_3)}$ – передаточная

функция от массы кузова к вертикальным перемещениям массы частей автомобиля, опирающейся на шины;

$W_5(p) = \frac{b_3 p + c_3}{m_3 p^2 + (b_2 + b_3)p + (c_2 + c_3)}$ – передаточная

функция от дороги к вертикальным перемещениям массы частей автомобиля, опирающихся на шины.

По уравнениям (7) строим укрупненную структурную схему. На рисунке 8 представлена схема моделирования колебаний системы «водитель–автомобиль–шина–дорога».

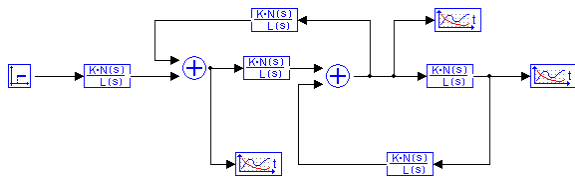


Рис. 8. Схема моделирования колебаний

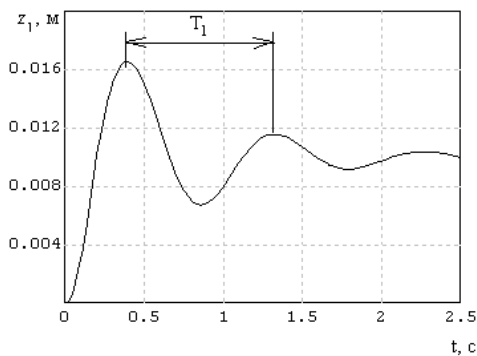


Рис. 9. Переходная характеристика центра масс кресла

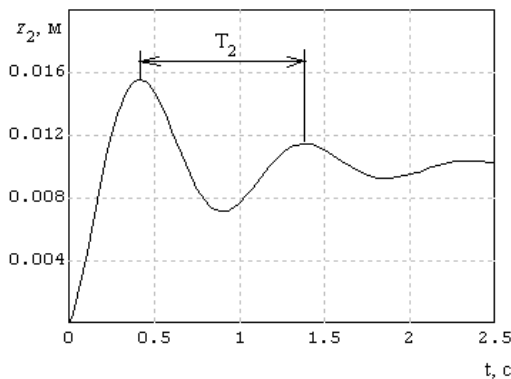


Рис. 10. Переходная характеристика центра масс кузова

Расчет выполним при следующих параметрах: $m_1 = 0,07$ т; $b_1 = 0,6$ кНс/м; $c_1 = 10,4$ кН/м; $m_2 = 1,579$ т.

Остальные параметры системы остаются без изменения. Значения коэффициентов передаточных функций приведены в таблице 2.

Таблица 2

Приведенные коэффициенты передаточных функций

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	m1	b1	c1	m2	b2	c2	m3	b3	c3
2	0,07	0,6	10,4	1,579	5,9	85	0,17	4,24	770
3	w1	w2	w3	w4	w5	c1+c2	c2+c3		
4	a1	0,05769	0,06813	0,06813	0,01186	0,01186	95,4	855	
5	a2	0,00673	0,01655	0,01655	0,0002	0,0002			
6	b0	1	0,10901	0,89099	0,09942	0,90058			
7	b1	0,05769	0,00629	0,06184	0,0069	0,00496			

На рисунках 9 и 10 представлены переходные характеристики со следующими параметрами: $T_1 = T_2 = 0,9$ с; $z_{1max} = 0,0165$ м; $z_{2max} = 0,0156$ м.

Выводы. Полученные результаты исследований показывают, что в системе моделирования МВТУ 3.7 можно получать переходные характеристики сложных динамических систем, но нельзя получить амплитудно-частотные характеристики. Кроме того, нет возможности провести параметрическую оптимизацию. Поэтому необходимо создавать дополнительные программные продукты на современных языках программирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы автоматического регулирования: практикум по математическому моделированию / Б. А. Карташов [и др.] ; под ред. Б. А. Карташова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2015. – 458 с. : ил. – (Высшее образование). – Библиогр.: с. 452–453.
2. Программный комплекс для автоматизированного исследования и проектирования промышленных роботов / Котов Е. А., Максимов А. И., Польский В. А., Скворцов Л. М. – Москва : Машиностроение, 1991. – 71 с.
3. Моделирование и оптимизация колебательных процессов колесных машин : конспект лекций / ПГАСА ; сост. Н. М. Ершова, В. И. Ершов. – Днепропетровск : ПГАСА, 2001. – 148 с.
4. Ершова Н. М. Современные методы теории проектирования и управления сложными динамическими системами : монография / Н. М. Ершова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2016. – 272 с.
5. Крутько П. Д. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / П. Д. Крутько, А. И. Максимов, Л. М. Скворцов ; под ред. П. Д. Крутько. – Москва : Радио и связь, 1988. – 306 с.
6. Инструкция пользователя программным комплексом «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ», версия 3.6) / О. С. Козлов, Д. Е. Кондаков, Л. М. Скворцов, В. В. Ходаковский. – Москва : Изд.во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 187 с.

7. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник для вузов : в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – (Методы теории автоматического управления).
8. Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования / под ред. Б. А. Карташова. – Москва : КолосС, 2004. – 184 с.

REFERENCES

1. Kartashov B.A. *Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Systems of automatic regulation]. Rostov-na-Donu: Feniks, 2015, ed. 2, 458 p. (in Russian).
2. Kotov E.A., Maksimov A.M., Pol'skij V.A. and Skvorcov L.M. *Programmnyj kompleks dlya avtomatizirovannogo issledovaniya i proektirovaniya promyshlennykh robotov* [The software package for computer-aided research and design of industrial robots]. Moskva: Mashinostroenie, 1991, 56 p. (in Russian).
3. Ershova N.M. and Ershov V.I. *Modelirovanie i optimizaciya kolebatelnykh protsessov kolesnykh mashin* [Modeling and optimization of processes of vibrational-wheeled vehicles: Lectures]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2001, 148 p. (in Russian).
4. Ershova N.M. *Sovremennye metody teorii proektirovaniya i upravleniya slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Modern methods of the theory of design and management of complex dynamical systems]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2016, 272 p. (in Russian).
5. Krutko P.D., Maksimov A.M. and Skvorcov L.M. *Algoritmy i programmy proektirovaniya avtomaticheskikh sistem* [Algorithms and software design of automatic systems]. Moskva: Radio i svyaz, 1988, 306 p. (in Russian).
6. Kozlov O.S., Kondakov D.E., Skvorcov L.M. and Khodakovskij V.V. *Instrukciya polzovatelya programmnyim kompleksom "Modelirovanie v texnicheskix ustroystvax" (PK "MVTU", versiya 3.6)* [Manual software package "Simulation in Technical Devices" (PC "SITD", version 3.6)]. Moskva: MGTU im. N.E. Bauman, 2008, 187 p. (in Russian).
7. Pupkov K.A., Egupov N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classic and present theories of automatic management]. *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of the theory of automatic control]. Moskva: MGTU im. N.E. Bauman, 2004. (in Russian).
8. Kartashov B.A. *Praktikum po avtomatike. Matematicheskoe modelirovanie sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Workshop on automation. Mathematical modeling of the automatic control systems]. Moskva: KolosS, 2004, 184 p. (in Russian).

Рецензент: Данишевський В. В., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 10.10.2017 р.

Прийнята до друку: 20.10.2017 р.