

# ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН



Том I

Улан-Удэ  
2018

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Российская Академия наук  
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и  
управления  
Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН  
Уханьский текстильный университет (Китай)  
Иркутский государственный университет путей сообщения  
Братский государственный университет

## ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН

Материалы  
VII Международной научной конференции  
*25 – 30 июня 2018 г.*

Том 2

Улан-Удэ  
Издательство ВСГУТУ  
2018



3. *Харахинов А.В., Мижидон А.Д.* Частотное уравнение для балки Тимошенко с упруго прикрепленным телом с двумя степенями свободы. // Вестник Бурятского государственного университета. – 2016. – № 4 – С.61-68.
4. *Харахинов А.В.* Исследование собственных колебаний балки Тимошенко с упруго прикрепленными твердыми телами // Материалы VI Международной конференции «Математика, её приложение и математическое образование (МПМО 2017)». – 2017 – С. 365-370.
5. *Мижидон А.Д., Харахинов А.В., Баргуев С.Г.* Математическая модель балки Тимошенко с упруго прикрепленным твердым телом с двумя степенями свободы // Материалы VI Международной конференции «Проблемы механики современных машин». – Том 1. – 2015. – С. 206-211.
6. *Гармаева В.В.* Комплекс программ по исследованию собственных колебаний системы твердых тел, установленной на упругом стержне стержне // Материалы VI Международной конференции «Проблемы механики современных машин». – Том 1. – 2015. – С. 127-132.
7. *Мижидон А.Д., Харахинов А.В., Гармаева В.В.* Расчет собственных частот балки Тимошенко с прикрепленными твердыми телами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613600 – 22 марта. 2017.

УДК 621.01

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SIMULATIONX\*

**Джомартов А.А.\*, Тулешов А.К.\*, Каймов А.Т.\***

*\*Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова,  
Казахстан, Алматы, legsert@mail.ru*

*В работе рассматривается динамический расчет цепной передачи на программном комплексе SimulationX. Составлена динамическая модель цепной передачи, которая позволяет учитывать неравномерность передачи движения и крутящего момента в соединениях цепной передачи с учетом инерционных характеристик, жесткости, демпфирования и люфтов. Наглядность моделей и графическое получение результатов будут особенно полезны для студентов и инженеров при исследовании существующих цепных передач.*

*Ключевые слова:* цепные передачи, моделирование, программный комплекс, SimulationX

#### MODELLING AND ANALYSIS OF MOVEMENT OF CHAIN TRANSMISSION ON SOFTWARE COMPLEX SIMULATIONX

**Jomartov A.A.\*, Tuleshov A.K.\*, Kaimov A.T.\***

*\* Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after U.A. Joldasbekova, Almaty,  
Kazakhstan, legsert@mail.ru*

*The paper considers the dynamic calculation of chain transmission on the SimulationX software package. Dynamic model of chain transmission is compiled. The model allows it possible to take into account the unevenness of the transmission of motion and the torque in the chains of the chain transmission, taking into account the inertial characteristics, stiffness, damping and backlash.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК, грантовый проект AP05134959

*Visibility of models and graphical results are especially useful for students and engineers in the research of existing chain transmissions*

**Key words:** chain transmission, modelling, software, SimulationX

### Введение

Моделирование и анализ движения современных сложных механизмов, в том числе и цепные передачи, подразумевает проведение большого объема расчетов с учетом упруго-диссипативных характеристик звеньев, сил трения, вязкого сопротивления, системы управления и.д.р. В настоящее время широко используется компьютерное моделирование движения сложных механизмов, с учетом большего количества факторов, влияющих на их работу, так называемое многодисциплинарное виртуальное моделирование. Разработка моделей движения механизмов, на основе современных программных комплексов, позволяющие выполнить анализ и оптимизацию конструкции изделия еще до изготовления его физического образца, является актуальной задачей. Целью настоящей работы является создание модели движения цепных механизмов, для виртуальных испытаний, на основе современного программного комплекса. Для достижения данной цели важно выбрать, подходящий для практического исследования соответствующий программный комплекс.

Существует большое количество различных программных комплексов, которые предназначены для проектирования и моделирования механических систем [1-12]. Наиболее успешно в данное время моделируется цепная передача на программном комплексе MSC.ADAMS [11]. В библиотеке специализированного решения, создания и расчета сложных механизмов был создан модуль Chain расчета цепных передач (рис. 1). Основные достоинства данного модуля: исключение ошибок связанных с растяжением цепи; получение истории нагружения звездочек цепного механизма; исследование колебаний цепи при различной нагрузке; влияние цепного привода на выходные параметры всей системы. Недостатками является дороговизна программного комплекса и сложность его применения.

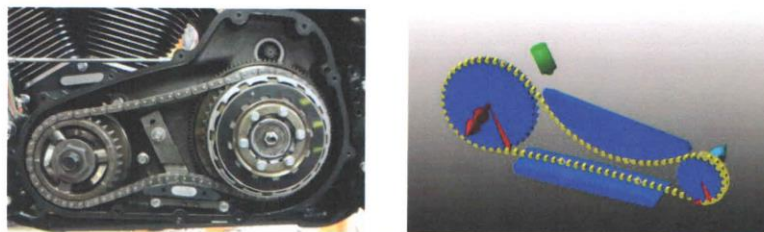


Рис. 1. Модель цепной передачи на модуле Chain программного комплекса MSC.ADAMS

Для моделирования и анализа движения цепных передач, в данной работе, предполагается использовать программный комплекс: SimulationX [12].

SimulationX – программный комплекс для моделирования и анализа динамики и кинематики автомобилей, машин, электро-, пневмо- и гидроприводов, гибридных двигателей и т. д. Используется для разработки, моделирования, симулирования, анализа и виртуального тестирования сложных машин и мехатронных систем. Моделирует поведение и взаимодействие различных физических объектов механики (1D и 3D), приводов, электрических, гидравлических, пневматических и термодинамических систем, и аналоговых и цифровых систем управления. Выполняет следующие задачи: моделирование системы во временной и частотной областях; моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных системах, стационарное моделирование в периодическом состоянии (нелинейном или линейном).

SimulationX - инструмент для виртуальных испытаний и позволяет еще на стадии разработки, когда затраты на доводку невелики, оценить правильность конструкторских решений, устранить недоработки и сократить число опытных образцов. Это позволяет экономить время и материальные затраты.

Достоинством программного комплекса SimulationX является его низкая цена по сравнению с программными продуктами компании MSC Software и хорошая наглядность при моделировании, простота и легкость освоения.

### 1. Цепная передача

Цепная передача — это передача механического движения при помощи цепи (гибкого элемента), за счёт сил зацепления. Цепная передача имеет постоянное или переменное передаточное число (цепной вариатор) [13-15].

Цепная передача имеет ведущую и ведомую звездочки и цепь (рис. 2). Цепь содержит подвижные звенья.

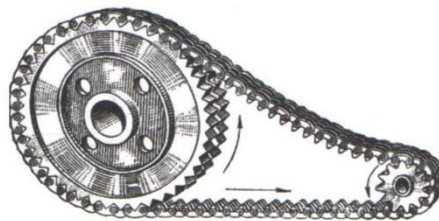


Рис. 2. Цепная передача

Число зубьев на звёздочках и звеньев цепи делают простыми, что обеспечивает равномерность износа: здесь каждый зуб звёздочки поочередно работает со всеми звеньями цепи.

Цепные передачи экономичны и просты в изготовлении. Они имеют простую компоновку, большую подвижность валов, менее чувствительны к неточностям, выдерживают ударные нагрузки, имеют большие межцентровые расстояния.

*Достоинства цепной передачи:*

- передача больших нагрузок, с постоянным передаточным числом, по сравнению с ременной передачей;
- передача движения посредством одной цепью нескольким звездочкам;
- передача движения на большие расстояния (до 7 м);
- в 2 раза меньшая радиальная нагрузка на валы, чем в ременных передачах;
- высокий КПД ( $\eta_{\max} \gg 0,9 \div 0,98$ );
- передача большой мощности;
- Большие скорости движения цепи до 30 м/с и передаточные числа 10.
- отсутствие скольжения цепи;
- малые габариты;

*Недостатки цепной передачи:*

- высокая стоимость изготовления цепей;
- отсутствие реверсирования без остановки;
- необходимость подвода смазки к шарнирам цепи;
- скорость цепи при равномерном вращении звездочки не постоянна.

Цепные передачи широко применяются в различных устройствах (велосипедах, мотоциклах, конвейерах, элеваторах), в приводах машин и станков.

## 2. Моделирование цепной передачи на программном комплексе SimulationX

В программном комплексе SimulationX для моделирования движения цепных передач разработана библиотека Цепные Приводы. Библиотека Цепные Приводы предлагает возможность реалистичного представления и анализа (замкнутых) цепных приводов, включая эффект многоугольника на основе колебаний в плоских системах. Типовыми областями применения являются анализ цепи распределения фаз газораспределения, цепей управления или приводных цепей распределительных валов транспортных средств, строительных машин или инструментальных станков. В любом случае, типовые структуры будут модульными и различными.

Основные принципы модели (функциональность разъемов и соединений), а также определения систем координат взяты из библиотеки Planar Mechanics. В дополнение к этому, модели библиотеки Цепных Приводов используются специальные типы Ременных и Цепных Соединений и Ременных и Цепных Соединителей для передачи специфических свойств цепи в системе. Следующие рис.3 а,б демонстрируют принцип моделирования в этой библиотеке. Элементы цепи соединяют звездочки. Контактующие части цепи у звездочек представлены элементами звездочек.

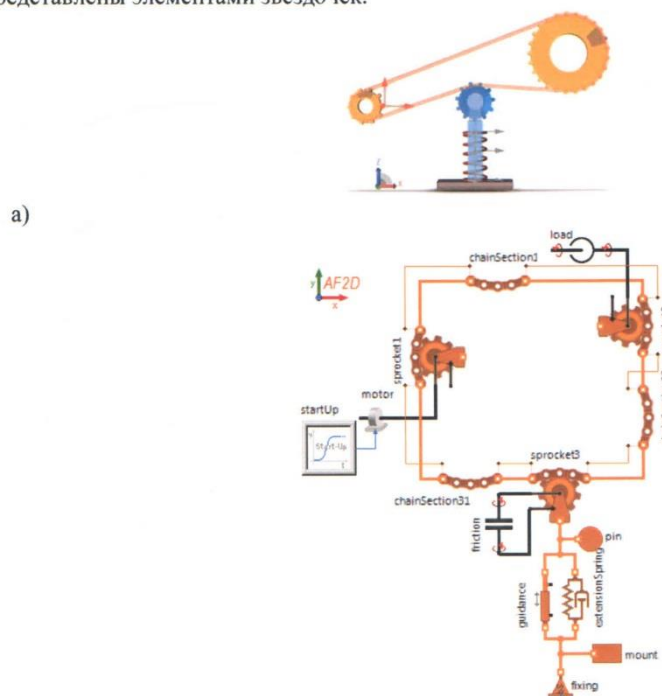


Рис. 3. Цепной привод с натяжным устройством на SimulationX: а) схема цепного привода; б) модель цепного привода

Полная модель цепной передачи представляет собой сумму элементов частей цепной передачи и контактирующих участков цепи.

Модели элементов частей цепной передачи могут соединяться со звездочками или элементами библиотеки Planar Mechanics (например, жесткие тела на конце свободной цепи могут применяться как нагрузки). Точки присоединения P1 и P2 элемента цепи всегда

расположены в цепных контактных точках K1 и K2 у звездочек («края многоугольника»). В этих точках цепь является касательной к окружности звездочки (рис. 4).

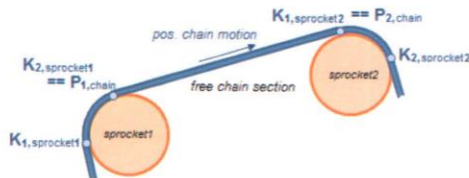


Рис. 4. Цепные контактные точки на звездочках

Положение этих точек будет вычисляться автоматически. Таким образом, нет никакой возможности для ввода их положения (отключенные параметры). 2D-Соединения между звездочкой (например, ctrK2) и сегмент секции цепи (например, ctr1) не имеют активных начальных значений. Если ничего не подсоединено к 2D-Соединению участка цепи, эта точка фиксируется в плоскости.

*Геометрия поперечных сечений цепей.* Элементы цепи (а также звездочки с их контактной частью секции цепи) принимают во внимание, для упрощенной визуализации частей цепи в 3D виде, следующее сечение, (рис. 5а). Параметры поперечного сечения цепи должны быть одинаковыми для всех звеньев цепи и звездочек.

Замечание: параметры поперечного сечения не влияют на физическое поведение, но они дают обратную связь о текущей параметризации.

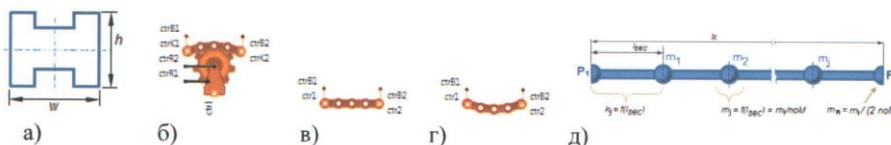


Рис. 5. Модели элементов частей цепной передачи: а) упрощенное сечение цепи для 3D-визуализации; б) элемент модели Звездочка; в) элемент модели Цепная Пружина; г) элемент Цепь (Масса-Пружина-Масса); д) дискретизация модели Цепь (Масса-Пружина-Масса)

На рис.5б показан элемент модели Звездочка. Модель Звездочка представляет собой округлую форму звездочки для систем цепных приводов.

Звездочка может перемещаться внутри плоскости или крепиться к раме: 2D-коннектор ctr1, предназначен для размещения элемента звездочки в плоской системе. Элемент влияет на геометрию, а также параметры жесткости и демпфирования включенной секции контактной цепи и на другие элементы цепи замкнутого цепного привода. Эта модель учитывает эффект многоугольника звездочек, который является причиной колебаний свободных цепей.

На рис. 5в показан элемент модели Цепная Пружина. Модель Цепная Пружина представляет собой свободную часть цепи для анализа продольных колебаний цепи. Модель представляет собой расширение базовой модели элемента силовой биполярной пружины-амортизатора библиотеки Planar Mechanics. Элемент вычисляет жесткость и демпфирующую силу, действующую на линию между точками контакта P1 и P2 (направление элемента - это соединительная линия между P1 и P2, см. рис. 4). Кроме того, этот элемент способен вычислять текущую массу секции и передавать ее в звездочки через Цепь.



Соединение. Масса цепи не влияет на модель Цепной Пружины. Это направление элемент линия является касательной на звездочке, P1 и P2 равны точкам контакта K1 и K2 цепи, соответственно, на звездочках. Элемент также может быть подключен к другим цепным элементам модели или элементам библиотеки Planar Mechanics. Модель вычисляет текущую жесткость и демпфирование в зависимости от текущей длины секции цепи.

На рис. 5г показан элемент Цепь (Масса-Пружина-Масса). Модель цепи (Mass-Spring-Mass) представляет собой ленту свободной цепи для анализа продольных и поперечных колебаний цепи (эффект многоугольника). Модель учитывает жесткость и демпфирование, а также массу пряди. Она имеет внутреннюю дискретизацию в массах и пружинных амортизаторах, как показано на рис. 5д. Модель представляет собой расширение базовой модели элемента силы Plane Forces библиотеки Planar Mechanics и вычисляет продольные и поперечные силы в направлении элемента.

### 3. Пример модели цепной передачи на SimulationX

Проведем расчет цепной передачи, схема которого приведена на рис. 3а. На рис. 6 приведена модель цепной передачи на SimulationX.

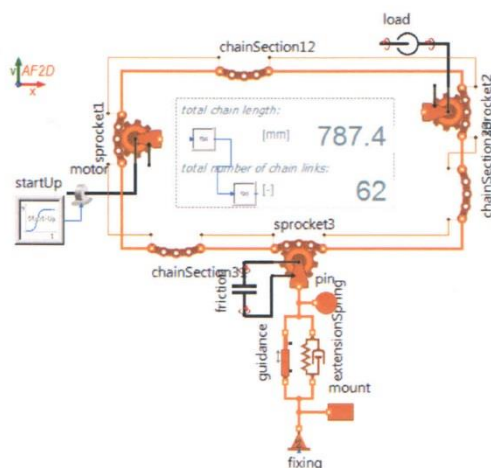


Рис. 6. Модель цепной передачи на SimulationX

#### Начальные данные параметров модели:

Входные параметры модели цепной передачи с натяжным устройством: скорость установившегося движения двигателя  $\omega_1 = 5$  рад/с; выходная нагрузка жидкостный демпфер с коэффициентом демпфирования  $b = 10 \text{ н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}$ ; параметры цепи – шаг цепи 12.7 мм, толщина 5мм, ширина 14 мм, линейная плотность цепи 0.218 кг/м, жесткость звена цепи  $k_i = 4 \cdot 10^6$  н/м, коэффициент демпфирования  $b = 20\sqrt{k_i}$ ; параметры звездочки 1 – масса  $m_1 = 1$  кг, момент инерции  $J_1 = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , число зубьев  $z_1 = 10$ ; параметры звездочки 2 – масса  $m_2 = 1$  кг, момент инерции  $J_2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , число зубьев  $z_2 = 25$ ; параметры звездочки 3 – масса  $m_3 = 1$  кг, момент инерции  $J_3 = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , число зубьев  $z_3 = 11$ ; параметры натяжного устройства -масса  $m_n = 1$  кг, жесткость пружины  $k_n = 5 \cdot 10^4$  н/м, коэффициент демпфирования  $b_n = 10\sqrt{k_n}$ , коэффициент трения скольжения  $f_n = 2 \text{ н} \cdot \text{м}$ .

*Результаты моделирования.* При расчете модели получены следующие результаты, графики которых приведены на рис. 7-9.

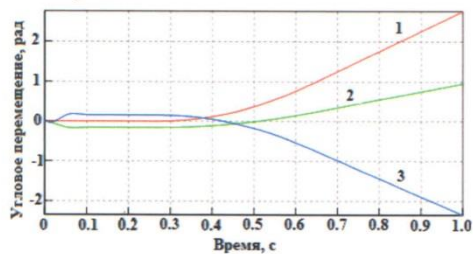


Рис. 7. Угловые перемещения звездочек 1,2,3

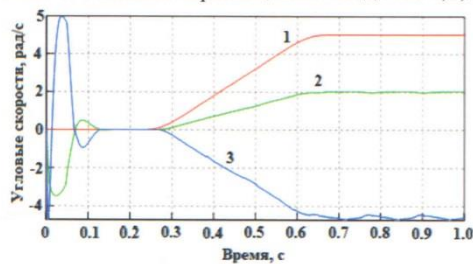
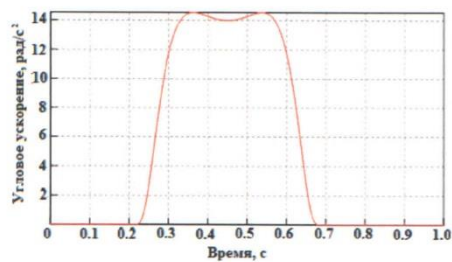
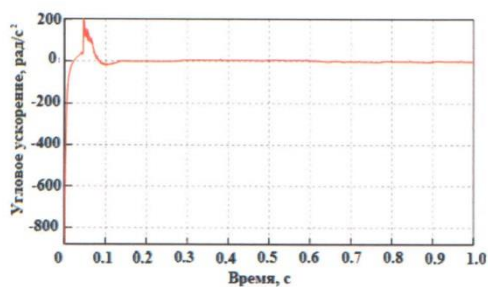


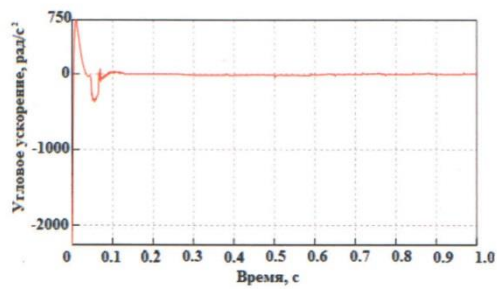
Рис. 8. Угловые скорости звездочек 1,2,3



а)



б)



в)

Рис. 9. Угловые ускорения: а) звездочки 1; б) звездочки 2; в) звездочки 3

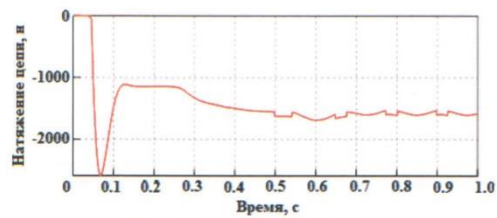


Рис. 10. Натяжение цепи

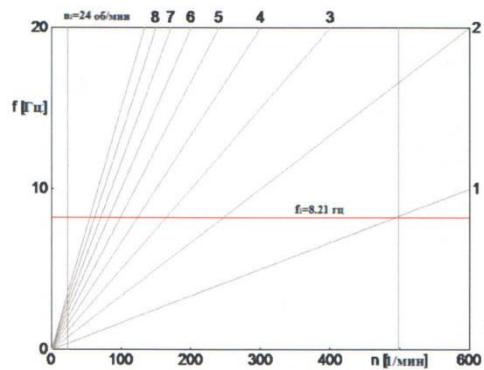


Рис. 11. Диаграмма Кэмпбелла

Обычно расчет на крутильные колебания сводится к определению критических частот и напряжений в коленчатом валу при резонансе, т.е. при совпадении частоты возбуждающей силы с одной из частот собственных колебаний вала. Для того чтобы сделать доступным математическое исследование влияние такого сложного по форме крутящего момента на крутильные колебания вала компрессора периодическую кривую, характеризующую крутящий момент, действующий на каждое колено вала, обычно раскладывают на ряд синусоид с различными амплитудами, начальными фазами и периодами, укладывающимися в период исходной кривой равное число фаз. Такой процесс разложения сложной

периодической кривой на гармонические (синусоидальные) составляющие называется гармоническим анализом, а отдельные гармонические составляющие – гармониками.

Если используется система регулирования изменением частоты вращения, то в этом случае целесообразно оценивать изменения среднего крутящего момента, амплитуды крутящего момента и ее гармоник и убедиться в достаточном запасе прочности или принять решение о дальнейшем вибрационном анализе.

Для определения резонансных частот при различных режимах работы цепной передачи удобно воспользоваться диаграммой Кэмпбелла (рис. 11). Здесь учитывается только первая собственная частота  $f_1 = 8.21$  Гц, т.к. следующие собственные частоты имеют значения намного превышающие первое. Проведя на диаграмме (рисунок 11) горизонтальные линии, соответствующие значениям частот собственных колебаний цепной передачи и найдя их точки пересечения с частотными характеристиками гармоник возбуждающего момента, находим значения критических оборотов для любой гармоники. При рабочем числе оборотов цепной передачи  $n_1 = 24$  об/мин в резонанс не попадают гармоники, порядок которых превышает 8.

Здесь рассматривая резонанс, как результат действия возбуждающих сил, имеем в виду резонанс гармоники того или иного порядка.

Резонансы в данной цепной передаче могут возникать от гармоник возбуждающего момента: от 1-й гармоники при  $n_1 = 500$  об/мин, от 2-й гармоники при  $n_1 = 250$  об/мин, от 3-й гармоники при  $n_1 = 167$  об/мин, от 4-й гармоники при  $n_1 = 124$  об/мин, от 5-й гармоники при  $n_1 = 100$  об/мин.

#### **Заключение**

Модель цепной передачи на программном комплексе SimulationX реалистично представляет замкнутые цепные передачи и позволяет провести динамический анализ с учетом требуемых параметров.

Модель цепной передачи на программном комплексе SimulationX может применяться как в учебном процессе, так и при исследовании существующих цепных передач и проектировании новых.

#### **Библиография**

1. *Teerawat Issariyakul, Ekram Hossain*. Introduction to Network Simulator NS2. Springer Science + Business Media, LLC, 2009. - 435 p.
2. *Васильев, В.А., Калмыкова М.А.* О классификации компьютерных программ. // Современные научные исследования и инновации, 2013: <http://web.snauka.ru/issues/2013/02/20478>
3. Программный пакет OPNET Technologies, Inc.: <http://www.opnet.com>.
4. Программный пакет Simulink - Simulation and Model-Based Design: [www.mathworks.com/products/simulink](http://www.mathworks.com/products/simulink).
5. Программный пакет The Network Simulator - NS-2: [www.isi.edu/nsnam/ns](http://www.isi.edu/nsnam/ns).
6. Программный пакет SaVi: <http://savi.sf.net>
7. *Куньв Ли* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
8. CAE. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_engineering](http://ru.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_engineering)
9. Сайт компании «Топ Системы»: <http://www.tflex.ru/>.
10. Сайт компании ANSYS Inc.: <http://www.ansys.com/>.
11. Сайт компании MSC.Software: <http://www.mscsoftware.ru/>.
12. Сайт компании ITI GmbH: <http://www.simulationx.com/>.
13. Общетехнический справочник./Под ред. *Скороходова Е. А.* – М.: Машиностроение, 1982. — 416 с.