

Метод формирования модели пониженного порядка микроэлектромеханической системы встроенными средствами программного пакета ANSYS

С.А. Синютин, О.Ю. Воронков

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В работе описана роль моделей пониженного порядка (МПП) в проектировании и испытаниях МЭМС, отражены их преимущества по сравнению с полными моделями метода конечных элементов (МКЭ) для поведенческого моделирования динамических характеристик МЭМС в реальном времени и разносторонних исследований свойств полученных объектов. Приведена математическая интерпретация процедуры понижения порядка системы уравнений динамики посредством перехода от полной модели, представленной в форме уравнений в переменных состояния, к уравнениям в переменных состояния МПП. Представлены два равноценных алгоритма последующей работы с МПП в программе MatLab в целях моделирования динамики МЭМС и изучения временных и частотных свойств модели: путём конструирования схемы из готовых функциональных блоков Simulink и путём написания программы в М-файле на специальном языке программирования MatLab.

Ключевые слова: микроэлектромеханическая система, метод конечных элементов, поведенческое моделирование, модель пониженного порядка, ANSYS, MatLab.

Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) характеризуются наличием непосредственной связи процессов из различных областей физики: механики, электростатики, гидродинамики и прочих [1–3]. В результате математическое описание динамики МЭМС требует применения уравнений в частных производных. Как правило, эти уравнения оказываются нелинейными, и по причине их взаимного влияния друг на друга поведенческое моделирование таких объектов значительно усложняется [4, 5]. Для аналитического решения упомянутых уравнений применяются методы конечных элементов (МКЭ) и разностей (МКР), сложность практической реализации которых напрямую зависит от точности математической модели. В большинстве случаев полные модели, предназначенные для этих методов, используют несколько сотен или тысяч переменных, влияние каждой из которых на общую динамику системы часто

недостаточно очевидно. Помимо этого, затруднительно поведенческое моделирование в реальном времени, которое при столь значительном количестве переменных нуждается в больших вычислительных мощностях. По этой причине полные модели для МКЭ и МКР используются, главным образом, для проверки характеристик готовых изделий, нежели для их проектирования. С другой стороны, для поведенческого моделирования в реальном времени, как правило, применяются сильно упрощённые модели из двух-трёх обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) [6, 7], которые не в состоянии с приемлемой точностью описать динамику объекта; кроме того, возникают значительные сложности при попытке вручную преобразовать модель МКЭ в поведенческую.

В данной работе ставится задача сокращения количества переменных модели МКЭ, отражающих движение изучаемой системы в пространстве состояний, до нескольких главных координат и преобразования этой модели в поведенческую в форме ОДУ. Предлагается решить эту задачу с применением моделей пониженного порядка (МПП), которые описывают лишь важнейшие динамические черты объекта с помощью нескольких переменных состояния и нескольких ОДУ [4]. Получаемую в результате упрощённую модель можно исследовать автономно или включить в совокупность моделей различных подсистем на уровне целой системы. В связи со значительно меньшим количеством переменных в МПП по сравнению с полной (исходной) моделью эффективность МПП для её использования в реальном времени не вызывает сомнений. Кроме экономии времени и машинных ресурсов, МПП также предоставляют возможность лёгкого построения на их основе поведенческих моделей, например, в среде MatLab Simulink, что является ещё одной их положительной чертой; при этом точность таких моделей оказывается значительно выше, чем точность сильно упрощённых поведенческих моделей из двух-трёх ОДУ.

Математически идея понижения порядка модели МКЭ заключена в том, что система уравнений в переменных состояния вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bf(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Df(t), \end{aligned} \quad (1)$$

обладающая высоким порядком (x – вектор состояния, f – вектор входных воздействий, y – вектор выхода; как правило, $D = 0$), подвергается сокращению числа переменных, которыми описывается динамика объекта, после чего приходит к виду:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\text{пониж.}}(t) &= A_{\text{пониж.}} x_{\text{пониж.}}(t) + B_{\text{пониж.}} f(t), \\ y(t) &= C_{\text{пониж.}} x_{\text{пониж.}}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Размерность матриц A , B , C и внутренних векторов состояния в МПП (2) оказывается значительно меньше, чем в модели МКЭ (1); при этом размерность векторов f и y сохраняется.

Для получения МПП из полных моделей МКЭ используются разные методы, подробно изложенные в работе [4]. В частности, система ANSYS, выполняющая конечно-элементное моделирование объектов [8], применяет для получения МПП встроенный алгоритм, основанный на модальном разложении.

Формирование МПП при наличии только элементов структурной механики

Во многих случаях исходная модель МЭМС включает в себя как структурные, так и электростатические параметры, и этот случай выходит за рамки данной статьи. Однако если в полной модели МКЭ присутствуют только элементы структурной механики, но нет электростатических компонентов, то необходимо использовать команду SPMWRITE, которая создает МПП в переменных состояния после модального анализа. Матрицы уравнений непосредственно отображаются на экране, что даёт возможность

их копирования напрямую в среду MatLab. Подробное изложение этой процедуры приводится в материале [9].

Работа с полученной моделью в среде программного пакета MatLab

В дальнейшем для формирования уравнений в переменных состояния, передаточной функции и построения временных и частотных характеристик синтезированной системы с использованием матриц A , B , C , D , созданных командой SPMWRITE, целесообразно воспользоваться одним из двух способов, доступных в MatLab [10].

Первый способ заключается в построении поведенческой модели датчика в среде Simulink со вводом полученных матриц в блок уравнений в переменных состояния (State-Space) и последующим исследованием реакции системы на различные типы входных воздействий для проверки корректности полученной модели. Также уместно проведение линейного анализа (Linear Analysis) для отображения логарифмических частотных характеристик, исследования устойчивости системы и т.д.

Второй способ предполагает написание программы на языке MatLab (М-файла). Такая программа основывается на встроенных функциях MatLab. Результаты построения временных и частотных характеристик для уравнений в переменных состояния и для передаточной функции одной и той же системы будут одинаковы.

Пример получения МПП в ANSYS и моделирования её динамики в MatLab

В качестве примера предлагается рассмотреть процедуру формирования МПП датчика на основе первых шести собственных мод колебаний с использованием исходной модели МКЭ из 7 600 уравнений. Файл Jobname.SPM, созданный в результате выполнения этой команды,

содержит искомые матрицы уравнений в переменных состояния (2), структура которых имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ \Gamma_1 & \Gamma_2 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \Gamma_3 \end{pmatrix}, C = (\Gamma_4 \quad 0), D = 0. \quad (3)$$

В результате получается система из 12-ти ОДУ. Поскольку в методе МКЭ используется СЛАУ с разреженными матрицами, для которых итерационные методы решения дают линейную зависимость времени решения от порядка матрицы, то при сокращении количества уравнений с 7600 до 12-ти получается повышение производительности в $633\frac{1}{3}$ раз. Это позволяет при загрузке МПП в MatLab проводить моделирование в реальном масштабе времени, а значит, имеется возможность отлаживать данную модель чувствительного элемента совместно с реальной аппаратурой обработки данных, то есть осуществлять полунатурное моделирование МЭМС-датчика, образец которого описан ниже.

Если выбран первый из двух предложенных вариантов работы в MatLab, заключающийся в построении поведенческой модели Simulink, то один из возможных вариантов блок-схемы такой модели в рассматриваемом случае будет выглядеть, как показано на рис. 1.

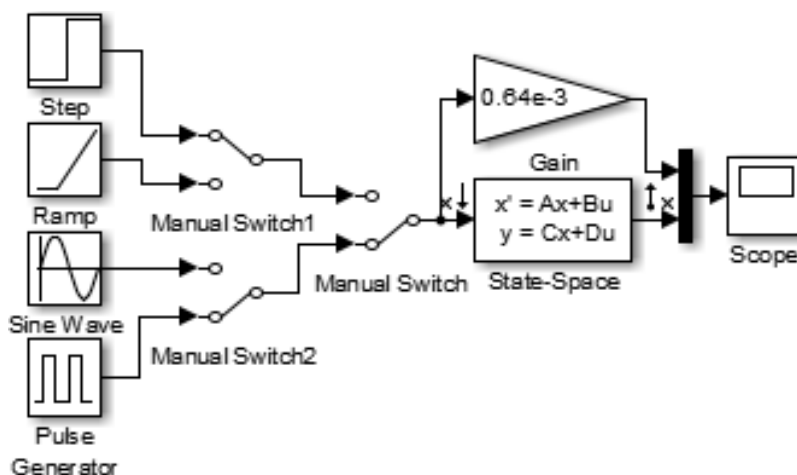


Рис. 1 – Схема опыта в среде Simulink программного пакета MatLab

Матрицы уравнений в переменных состояния внесены в блок State-Space, переключатели Manual Switch служат для смены входных воздействий, а пропорциональное звено Gain необходимо, чтобы совместить графики входного и выходного сигнала на экране Scope для большей наглядности.

На рис. 2 показана реакция полученной динамической системы на входные прямоугольные импульсы единичной амплитуды, длительности 300 мкс и периода следования 1 мс.

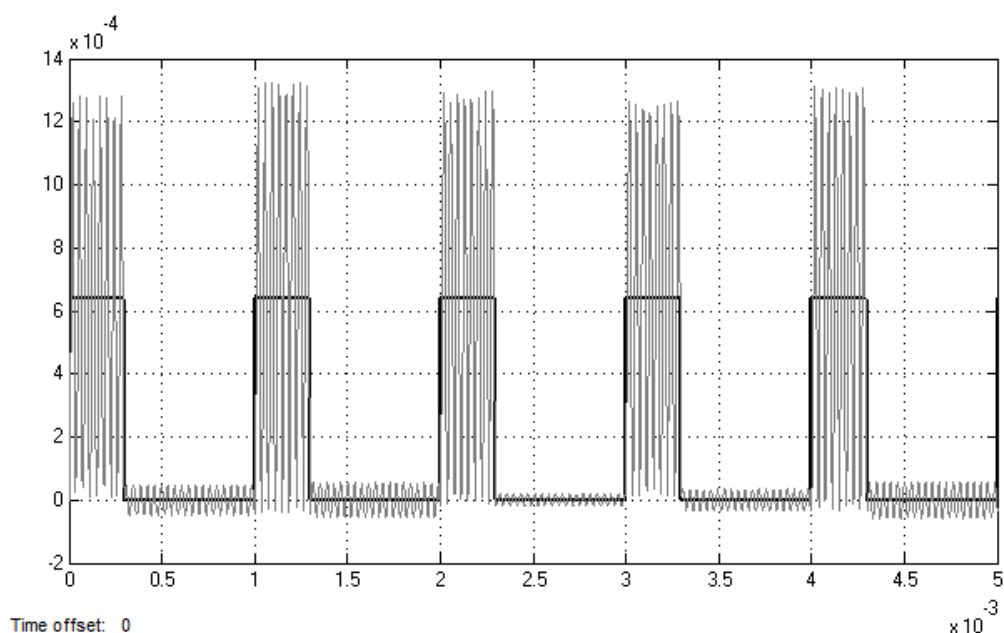


Рис. 2 – Реакция системы на прямоугольные импульсы

Линейный анализ, являющийся встроенной возможностью MatLab, требуется для более глубокого и разностороннего изучения динамических свойств объекта, его переходной функции, амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик. Результаты линейного анализа рассматриваемой модели представлены на рис. 3, 4.

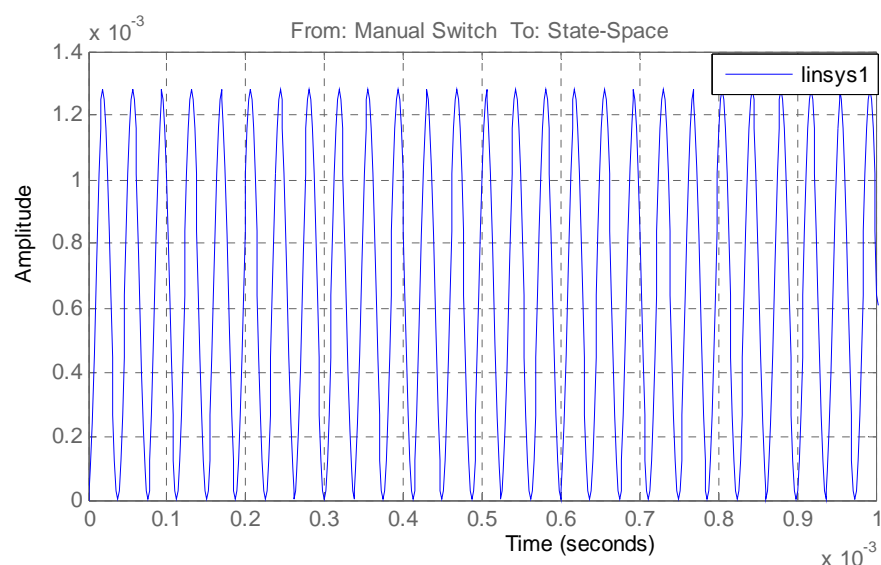


Рис. 3 – Переходная функция МПП

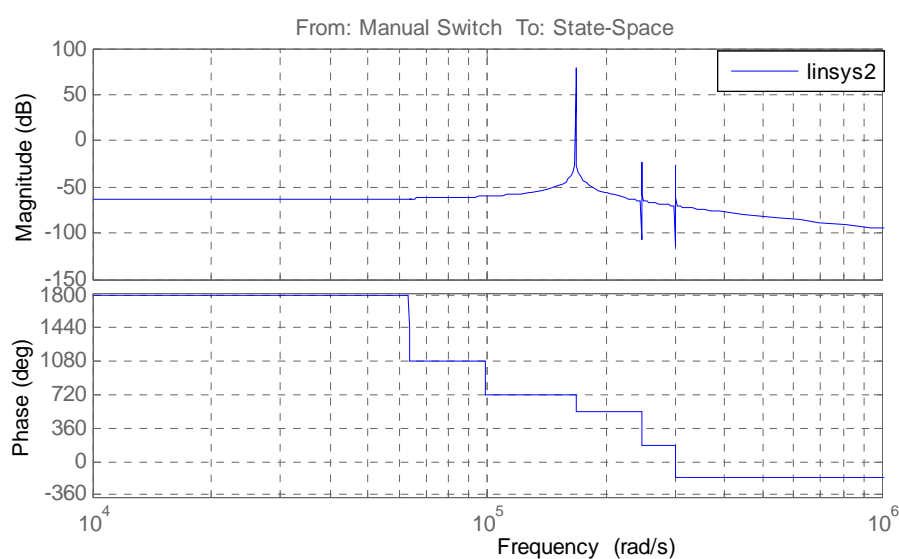


Рис. 4 – Логарифмические амплитудно-частотная (вверху) и фазочастотная (внизу) характеристики МПП

В случае, если предпочтительнее второй метод работы в виде составления М-файла с программой на языке MatLab, то в результате выполнения программы в командном окне MatLab отображаются математические модели системы в виде уравнений в переменных состояния и

в виде передаточной функции. Помимо этого, всплывают окна с графиками переходной функции (рис. 5) и частотных характеристик (рис. 6).

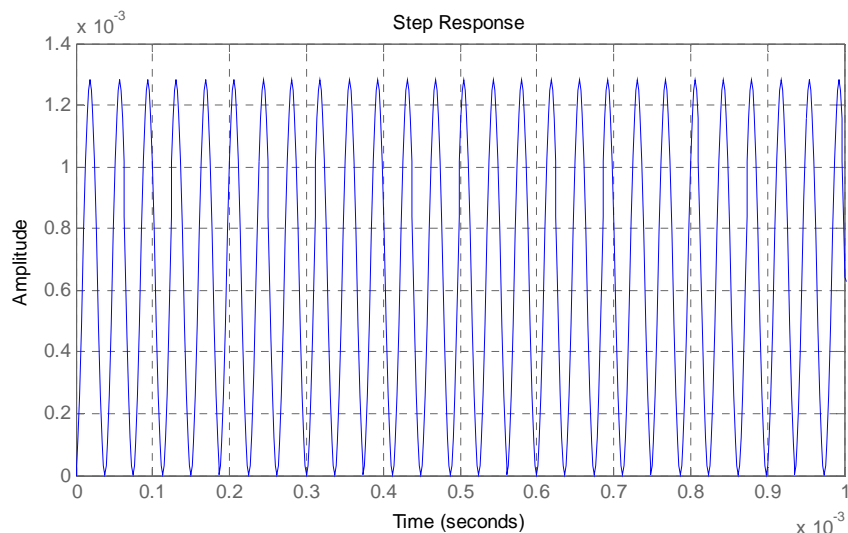


Рис. 5 – Переходная функция МПП

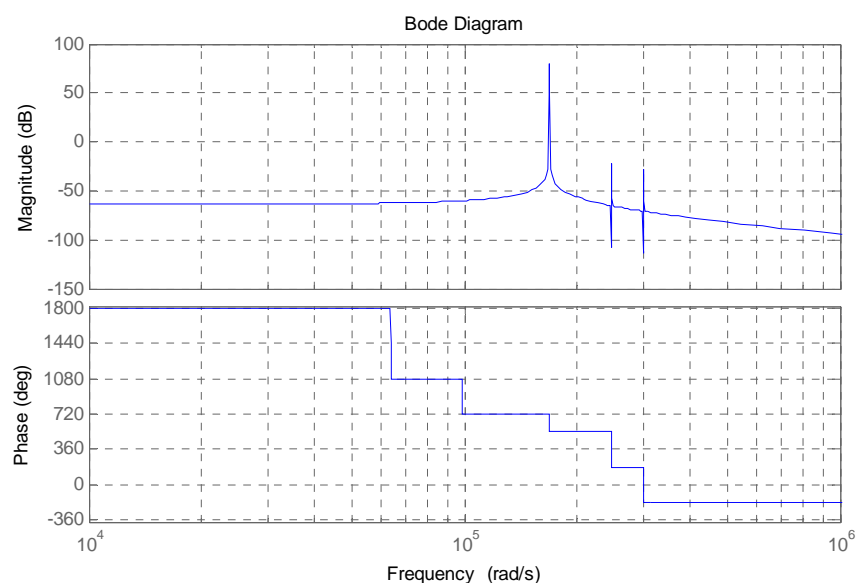


Рис. 6 – Логарифмические амплитудно-частотная (вверху) и фазочастотная (внизу) характеристики МПП

Посредством сравнения графиков на рис. 3 и 5, а также на рис. 4 и 6 можно констатировать их идентичность, что означает равноценность обоих

способов моделирования полученной системы уравнений в переменных состояниях в среде программного пакета MatLab.

Заключение

В данной работе изложен алгоритм автоматического получения МПП МЭМС встроенными средствами программного пакета ANSYS из полной модели МКЭ при наличии только элементов структурной механики в таком виде, который позволяет использовать эту модель в программе MatLab для поведенческого моделирования динамики объекта в реальном времени с сохранением его главных динамических характеристик после сокращения числа уравнений сразу после получения МПП, то есть без дополнительной трансформации вручную, что значительно снижает трудоёмкость и исключает ошибки в расчётах. Предлагаемый подход позволяет рассматривать ANSYS и MatLab совместно как единую среду для проектирования и моделирования МЭМС и прочих объектов. При необходимости сформированная МПП может быть адаптирована к различным языкам описания аппаратуры, например, VHDL, что существенно расширяет сферу её применения.

Если в полной модели микроэлектромеханического датчика необходимо учитывать не только механические, но и электростатические параметры, то процедура получения модели пониженного порядка усложняется, и её развёрнутое описание содержится в работе [11].

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению



правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам НТЦ «Техноцентр» ЮФУ Данилу Науменко и Филиппу Бондареву, принимавшим непосредственное участие в работе над получением МПП, приведённой в данной публикации в качестве примера.

Литература

1. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 103 с.
2. Jan G. Korvink and Oliver Paul. MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications. Norwich: William Andrew, Inc., 2006. 965 p.
3. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White. MEMS Mechanical Sensors. London: In-Print-Forever, 2003. 282 p.
4. Anatolii I. Petrenko. Macromodels of micro-electro-mechanical systems (MEMS) // Institute of the Applied System analysis of NTUU "KPI" URL: grid.kpi.ua/files/2011-2.pdf.
5. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учебное пособие / Брюка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
6. Синютин С.А., Лысенко И.Е., Воронков О.Ю. Разработка поведенческой модели сенсора линейного ускорения с двумя осями чувствительности для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab. Инженерный вестник Дона, 2014, №4. - URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2672.
7. Лысенко И.Е., Синютин С.А., Воронков О.Ю. Поведенческая модель микромеханического сенсора угловых скоростей для моделирования в среде Simulink программного пакета MatLab. Инженерный вестник Дона, 2014, №4. - URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2674.



8. Моделирование элементов микросистемной техники в программе ANSYS: учебно-методическое пособие / Лысенко И.Е., Куликова И.В., Полищук Е.В. и др. Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. 42 с.
9. Справочная система программного пакета ANSYS Workbench 15.0.
10. Поршнева С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2003. 592 с.
11. Воронков О.Ю., Синютин С.А. Метод создания макромоделей МЭМС в программном пакете ANSYS. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3 (164). С. 193-200.

References

1. Lysenko I.E. Proektirovanie sensoryh I aktyunyuatornyh elementov mikrosistemnoy tehniky [Design of sensor and microsystem technology aktyuatornyh elements]. Taganrog: TSURE, 2005. 103 p.
2. Jan G. Korvink and Oliver Paul. MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications. Norwich: William Andrew, Inc., 2006. 965 p.
3. Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White. MEMS Mechanical Sensors. London: In-Print-Forever, 2003. 282 p.
4. A. I. Petrenko. Macromodels of micro-electro-mechanical systems (MEMS) Institute of the Applied System analysis of NTUU "KPI" URL: grid.kpi.ua/files/2011-2.pdf.
5. Inzhenernyy analiz vANSYS Workbench: uchebnoe posobie [The engineering analysis in ANSYS Workbench: Tutorial] Samar. state. tehn. University Press, 2010. 271 p.
6. Sinyutin S.A., Lysenko I.E., O.Yu.Voronkov Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2674.



7. Sinyutin S.A., Lysenko I.E., O.Yu.Voronkov Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2674.
8. Lysenko I.E., IV Kulikova, Elena Polishchuk etc. Modelirovanie elementov mikrosistemnoy tehniki v programme ANSYS [Modeling elements of microsystem technology in the ANSYS program: teaching manual] Taganrog Univ. of Technology Institute of Southern Federal University, 2007. 42 p.
9. The help system of ANSYS Workbench 15.0 software package.
10. Porshnev S.V. Kompyuternoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v pakete fizicheskikh protsessov v pakete MATLAB [Computer modeling of physical processes in the MATLAB package]. M.: Goryachyaya liniya-Telecom, 2003. 592 p.
11. Voronkov O.Yu., Sinyutin S.A. Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki. 2015. №3 (164). pp. 193-200.