

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

В. Н. Седалищев, М. Ю. Ларионов, А. А. Рябцева
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»,
г. Барнаул

В статье приведено описание вариантов конструктивного исполнения многофункциональных датчиков, основанных на использовании связанных колебаний пьезорезонаторов, приведены их эквивалентные электрические схемы замещения, приведены результаты имитационного моделирования метрологических характеристик, выработаны рекомендации по конструктивному исполнению и режимам работы измерительных устройств.

Ключевые слова: связанные колебания пьезорезонаторов, эквивалентная электрическая схема замещения пьезорезонансного датчика.

Пьезорезонансные датчики (ПРД) применяются для измерения различных физических величин, в том числе и для измерения физико-механических характеристик жидких сред [1]. С целью расширения функциональных возможностей и повышения метрологических характеристик ПРД было предложено осуществлять управление высокочувствительными нелинейными процессами связанных колебаний в пьезорезонансных структурах в функции измеряемых воздействий [2-9]. Первичные измерительные преобразователи (ИП) такого типа могут состоять из одного или нескольких ПР, вибраторов и элементов связи между ними [5]. Эквивалентные электрические схемы замещения (ЭЭСЗ) таких ИП могут включать в себя в общем случае большое число взаимосвязанных контуров, элементов связи между ними, что существенно усложняет аналитическое описание режимов работы и метрологических характеристик таких измерительных устройств [2]. При этом необходимо учитывать особенности реализации связанных колебаний в таких системах, величину добротности и расстройку собственных частот осцилляторов, уровень и характер связи между отдельными степенями свободы, соотношение амплитуд их колебаний и др. В связи с этим, разработка и оптимизация конструкции и режимов работы датчиков, основанных на модуляции связанных колебаний пьезорезонаторов (МСК ПРД), яв-

ляется достаточно сложной многофакторной задачей.

На рисунке 1 представлены три варианта конструктивного исполнения макетов МСК ПРД вязкоупругих характеристик жидких сред с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы.

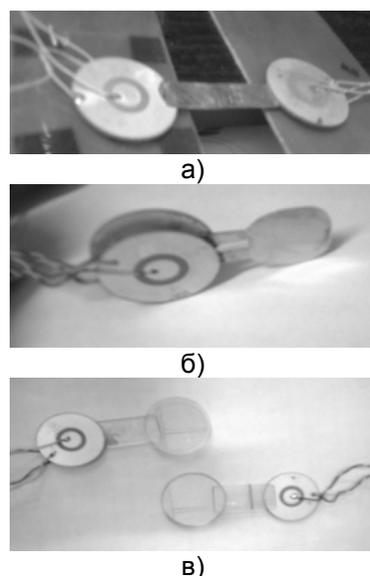


Рисунок 1 – Внешний вид макетов МСК ПРД дифференциального типа с различным числом степеней свободы: с чувствительным элементом связи (а); с дополнительным вибратором в качестве чувствительного

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №1 2014

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

элемента (б); с чувствительным элементом в виде микрозазора между составными ПР (в)

Для исследования частотных зависимостей метрологических характеристик измерительных устройств такого типа было осуществлено имитационное моделирование с использованием программы Micro-Cap [2]. На рисунке 2 приведены ЭЭСЗ и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) колебательной системы с двумя степенями свободы при разных уровнях связанности в системе.

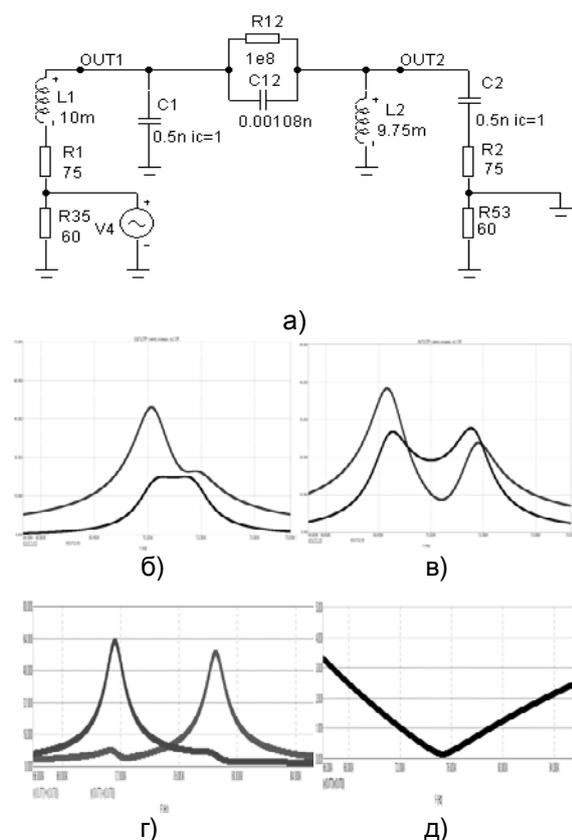


Рисунок 2 – ЭЭСЗ (а), АЧХ МСК ПРД при слабой (б) и сильной (в) связанности в системе; частотные зависимости для разности, суммы (г) и отношения амплитуд колебаний осцилляторов (д).

Из приведенных графиков следует, что измеряя разность и сумму амплитуд связанных колебаний можно определить номер возбуждаемой нормальной частоты синхронизации в системе (НЧС). Отношение амплитуд колебаний практически линейно зависит от частоты и достигает минимума области парциальных частот осцилляторов (в промежутке между НЧС).

При выполнении имитационного моделирования для оценки метрологических характеристик МСК ПРД, предназначенных для измерения вязкости, упругости и плотности жидких сред, были осуществлены приращенные соответствующих параметров ЭЭСЗ ИП. В первом случае изменялось активное сопротивление в эквивалентных контурах и элементах связи, во втором случае – емкость, в третьем – индуктивность.

На рисунках 3-8 приведены частотные зависимости чувствительности и эффективности измерения реактивных и активных сопротивлений в цепи одного из контуров.

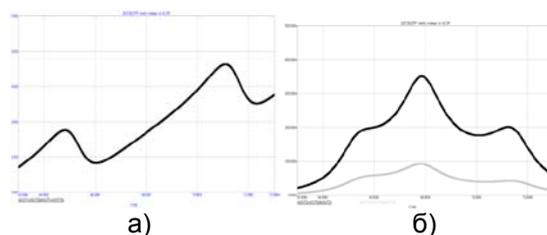


Рисунок 3 – Частотные зависимости чувствительности измерения реактивного и активного сопротивления в первом (а) и во втором (б) контурах (выходной сигнал ИП – амплитуда колебаний осциллятора)

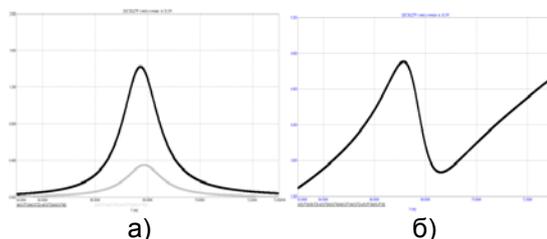


Рисунок 4 – Частотные зависимости чувствительности (а) и эффективности (б) измерения при использовании в качестве выходного сигнала ИП отношения амплитуд связанных колебаний осцилляторов

Как можно видеть, максимумы чувствительности и эффективности при измерении реактивных и активных параметров контуров достигаются, соответственно, в окрестностях НЧС и на парциальных частотах колебаний в системе и зависят от добротности используемых осцилляторов. Можно рекомендовать использование высокодобротных ПР с целью повышения чувствительности измерения плотности и упругих свойств газов, жидких сред, твердых тел. При создании датчиков вязкости нужно, наоборот, снижать доброт-

ность колебательной системы датчика, увеличивать площадь контакта резонаторов с исследуемой средой, создавать многоэлементные датчики в виде цепочки вибраторов и т.п.

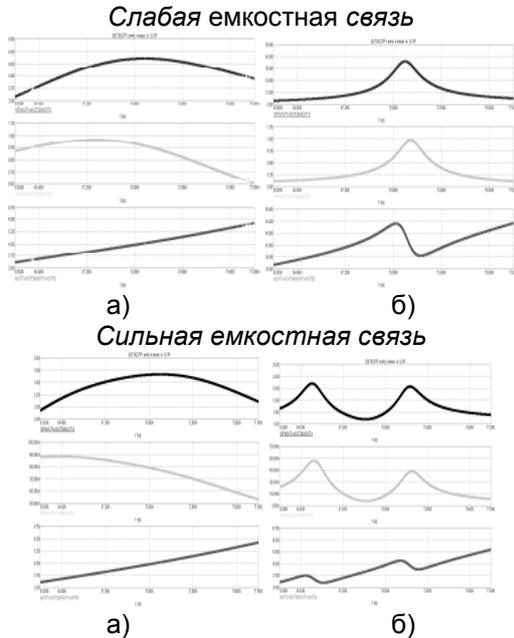


Рисунок 5 – Частотные зависимости чувствительности и эффективности измерения реактивного и активного сопротивления в контуре

Анализ приведенных графических зависимостей показывает, что с повышением уровня связи между осцилляторами снижаются относительная чувствительность и эффективность измерения упругости и плотности исследуемой среды и, наоборот, возрастают при измерении вязкости. При использовании в качестве выходного сигнала МСК ПРД разности амплитуд колебаний осцилляторов повышенная чувствительность измерения реактивных параметров осцилляторов будет наблюдаться на одной НЧС, а при измерении суммы амплитуд колебаний ПР - на другой НЧС. Видно, что не совпадают рабочие частоты ИП, при которых достигаются максимальные значения чувствительности измерения реактивных и активных сопротивлений осцилляторов. При использовании в качестве выходного сигнала амплитуд, суммы, разности или отношения амплитуд колебаний осцилляторов чувствительность измерения может существенно отличаться. Эффективность измерения при этом соответствует добротности используемых осцилляторов.

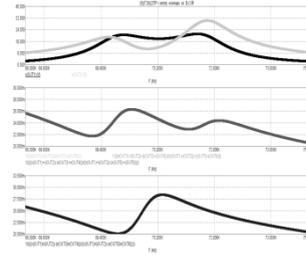


Рисунок 6 – Частотные зависимости эффективности измерения активного сопротивления ПР при измерении амплитуд колебаний, разности, суммы и отношения амплитуд колебаний ПР.

Как следует из приведенных графиков, максимальная эффективность измерения активного сопротивления контура достигается в промежутке между НЧС, причем при измерении отношения амплитуд колебаний осцилляторов. Если элементом связи между резонаторами является измеряемая среда, связь при этом будет, скорее всего, преимущественно резистивной, слабой или сильной в зависимости от площади контакта исследуемой жидкости с поверхностью ПР или вибратора.

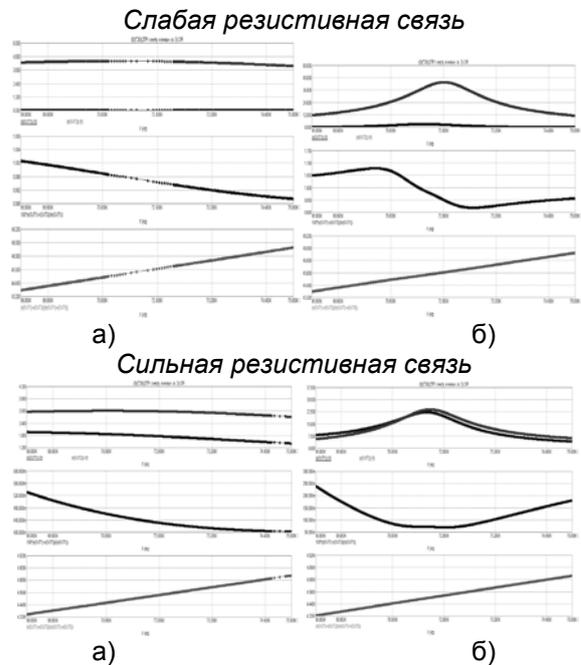


Рисунок 7 – Частотные зависимости амплитуд колебаний осцилляторов, чувствительности и эффективности измерения реактивных сопротивлений ИП при использовании низко- (а) и высокодобротных (б) осцилляторов

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

Полученные результаты показывают, что с повышением добротности осцилляторов возрастает чувствительность ИП к изменению его реактивных сопротивлений, которая достигает максимальных значений при критической связи в системе. С увеличением связанности осцилляторов возрастает эффективность измерения реактивных параметров ИП.

При усилении упругой связи между резонаторами и вибраторами, например, в результате увеличении жесткости контакта в элементе связи, в ведомом осцилляторе возрастает амплитуда колебаний, снижается чувствительность. Эффективность измерения упругих свойств элемента связи при этом увеличивается, а эффективность измерения активных потерь в контакте уменьшается. Режим сильной упругой связи реализуется при контакте твердых тел. При контакте через жидкость преобладает резистивная связь. При наличии слабой упругой связи усиление резистивной связи приводит так же к увеличению амплитуды колебаний в ведомом осцилляторе. При этом снижается чувствительность к измерению резистивной связи, но в гораздо меньшей степени, чем при реактивной связи. Это обуславливает возрастание эффективности измерения активного сопротивления в элементе связи и снижение эффективности измерения реактивных параметров в элементе связи. Поэтому такой тип ИП рекомендуется использовать для измерения вязкости жидких сред.

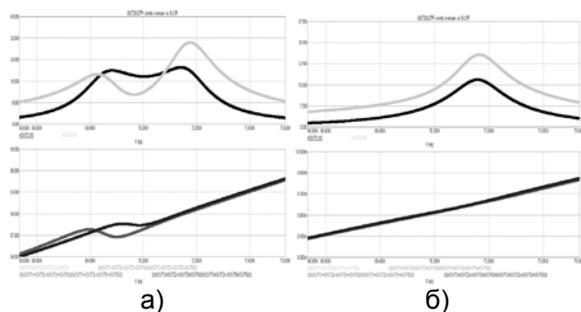


Рисунок 8 – Частотные зависимости эффективности измерения емкости в элементе связи при преимущественно реактивной (а) и активной (б) связи между осцилляторами

Приведенные зависимости позволяют сделать вывод о том, что если исследуемая среда контактирует с ПР и является элементом связи между ними, то при измерении упругих характеристик среды повышение эффективности измерения упругости и плотно-

сти среды достигается при использовании высокодобротных осцилляторов, а при измерении вязкости – низкодобротных. При этом максимальная эффективность измерения упругих характеристик среды обеспечивается при преимущественно упругой связи между резонаторами, а при измерении вязкости – при преобладании резистивной связи.

Таким образом, при создании МСК ПРД, например, вязкости жидких сред с целью повышения эффективности измерительного процесса нужно использовать низкодобротные ПР (вибраторы), причем связь между ними должна была преимущественно резистивной. Для этой цели лучше использовать внутреннюю связь, а элементом связи между резонаторами может служить тонкий слой исследуемой жидкости. Нужно учитывать так же и то, что в исследуемой среде будут возбуждаться высокочастотные сдвиговые колебания, поэтому толщина исследуемой жидкости должна быть не большой (в пределах миллиметра). Соблюдение этого условия необходимо для обеспечения требуемого уровня упруго-резистивной связи между резонаторами. Для ИП такого типа можно использовать составные ПР, ПР с протяженными элементами связи между которыми будет находиться исследуемая среда и т.п.

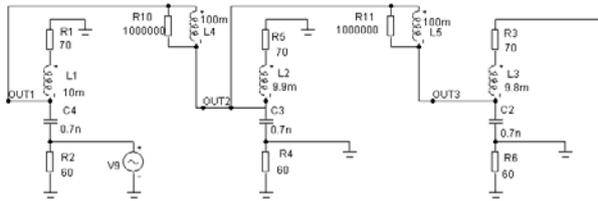
В качестве чувствительного элемента МСК ПРД вязкости может использовать и дополнительный вибратор, который так же будет выполнять функции элемента связи между пьезорезонаторами.

При измерении упругости жидкости исследуемая среда должна контактировать с вибраторами. Для этой цели, например, можно поместить на поверхность вибратора небольшой объем исследуемой жидкости.

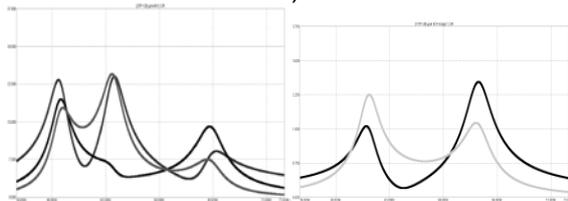
Как показывает опыт разработки МСК ПРД вязкоупругих характеристик жидких сред с целью повышения их метрологических и эксплуатационных характеристик приходится использовать более сложных конструкций чувствительных элементов, например, на базе колебательных систем с тремя и четырьмя степенями свободы. В системе МСК ПРД с тремя степенями свободы (Рисунок - 16) металлический вибратор находится в промежутке между двумя ПР и выполняет роль чувствительного элемента датчика. МСК ПРД с четырьмя степенями свободы состоит из двух составных ПР, взаимодействующих между собой через исследуемую среду.

На рисунках 9 -15 приведены графики, полученные методом имитационного моделирования, отражающие частотные зависи-

мости выходных параметров МСК ИП с тремя и четырьмя степенями свободы.

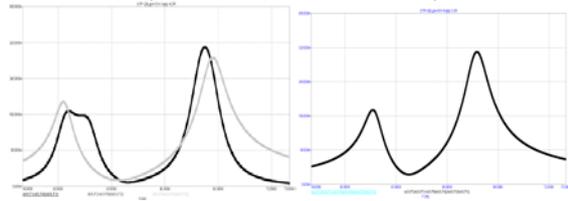


а)



б)

в)



г)

д)

Рисунок 9 – ЭЭСЗ МСК ИП с тремя степенями свободы (а), его АЧХ, (б), частотные зависимости отношения амплитуд колебаний боковых осцилляторов (в) и чувствительность измерения (по амплитудам колебаний боковых осцилляторов) реактивного (г) и активного сопротивлений (д) в среднем контуре

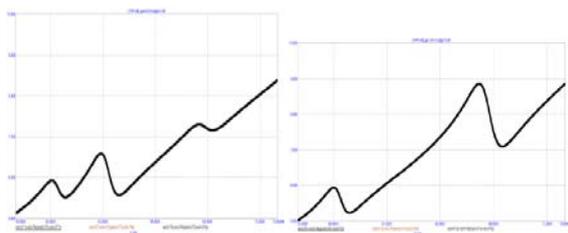
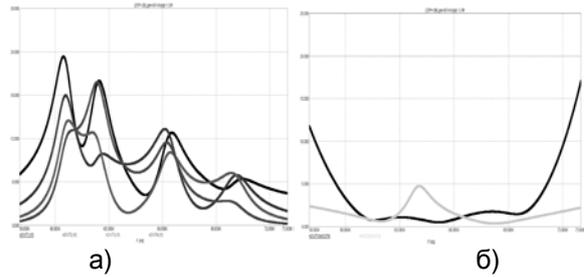


Рисунок 10 – Частотные зависимости эффективности измерения реактивного сопротивления в среднем контуре по амплитудам (а) и отношению амплитуд (б) колебаний боковых осцилляторов

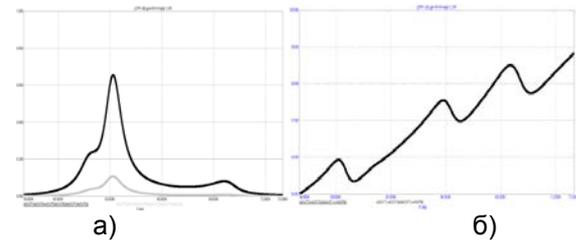
На рисунках 11-14 представлены результаты моделирования МСК ПРД с четырьмя степенями свободы, основанного на использовании двух составных пьезорезонаторов (Рисунок 1,в).



а)

б)

Рисунок 11 – АЧХ МСК ПРД с четырьмя степенями свободы (а), частотные зависимости для отношения амплитуд колебаний боковых осцилляторов и чувствительности измерения реактивных и активных параметров ИП (б)



а)

б)

Рисунок – 12. Частотные зависимости чувствительности (а) и эффективностей (б) измерения реактивных параметров промежуточных контуров по отношению амплитуд колебаний боковых осцилляторов

Как следует из приведенных графиков, чувствительность и эффективность измерения активных и реактивных параметров исследуемых сред зависит от характера взаимных перемещений поверхностей резонаторов и достигает максимальных значений в окрестностях определенных НЧС в системе или в промежутке между ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малов, В.В. Пьезорезонансные датчики. – М: Энергоатом издат, 1989. – 272 с.
2. Седалищев, В.Н. Применение имитационного моделирования для сравнительного анализа вариантов построения многоэлементных пьезорезонансных датчиков / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов // Ползуновский альманах. - 2012. – № 2. – С. 37-42.
3. Седалищев, В.Н. Акусточувствительный датчик статических усилий с использованием связанных колебаний пьезорезонаторов / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов, С. П. Пронин, А. В. Новичихин, Е. М. Крючков // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 71-72.
4. Седалищев, В.Н. Использование связанных колебаний пьезорезонаторов для исследова-

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД
НА ОСНОВЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

ния физико-механических и трибологических характеристик поверхности твердых тел / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов Е. М. Крючков, А. В. Новичихин // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 6-10.

5. Седалищев, В.Н. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации / В.Н. Седалищев, О.И. Хомутов – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – 184 с.; 55 см. – Библиогр.; с. 180 – 184. – 100 экз. – ISBN 5-7568-0669-5

6. Седалищев, В.Н. Пьезорезонансный МСК датчик вязкоупругих характеристик жидких сред с микозазором / В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов С.А. Синеев, А.А. Соснова, Д.О. Страхатов// Ползуновский альманах. – 2013. – № 1. – С. 145-148

7. Седалищев, В.Н. Устройство для измерения уровня сыпучих материалов // Приборы и сис-

темы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 6. – С. 49-50.

8. Седалищев, В.Н. Особенности конструирования пьезоэлектрических измерительных устройств на связанных колебаниях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 4. – С. 44-46.

9. Седалищев, В.Н. Использование связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Измерительная техника. – 2006. – № 3. – С. 59-61.

Седалищев Виктор Николаевич – д.т.н., профессор, тел.: (3852) 260492, e-mail: sedalischew@mail.ru; Ларионов Максим Юрьевич – аспирант, тел.: (3852) 260492; Рябцева Анна Александровна – магистрант, тел.: (3852) 260492.