

УДК 535.8; 538.958

МИКРОЛИНЗОВЫЕ РЕШЕТКИ С ЭФФЕКТОМ «ПЛАВАЮЩЕГО» ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.К. Баля, В.Г. Булгакова, И.Ю. Денисюк

Разработан и исследован простой и эффективный способ получения микролинзовых растров с высокой плотностью заполнения поверхности путем термоформования полимерной пленки на матрице, получаемой методом лазерной абляции черной резины на лазерном гравере. Получены решетки микролинз с фокусными расстояниями 0,5 мм и 1,2 мм в зависимости от времени термообработки. Микролинзовые растры обеспечивают видимый моушен-эффект: при изменении точки наблюдения становятся видимыми различные части микроизображения, а поскольку видимое изображение оказывается увеличенным и синтезированным из многих элементарных изображений, наблюдается эффект «плавающего» изображения. Микролинзовые растры были использованы для изготовления металлических мастер-матриц методом гальванопластики с дальнейшим получением полимерных копий на пленке с использованием горячего эмбоссинга.

Ключевые слова: термоформование, микролинза, лазерная абляция, полимер, моушен-эффект.

Введение

Для защиты товаров от подделок традиционно используют голографические наклейки. К сожалению, в последние годы распространенность аппаратуры и технологии получения защитных голограмм привела к тому, что степень защиты с такой наклейкой невелика, поскольку голограммы легко подделывают. Один из путей преодоления этой проблемы – использование других элементов и оптических эффектов, не связанных с получением голограмм. Например, могут быть использованы микролинзовые растры, формирующие мнимое синтезированное изображение, которое смещается при изменении угла наблюдения, т.е. «плавающее» изображение.

«Плавающие» изображения, используемые как защитный признак, представляют собой мнимое изображение, формируемое вне поверхности документа, которое сдвигается при смещении точки наблюдения. Общий принцип получения «плавающих» изображений проиллюстрирован на (рис. 1).

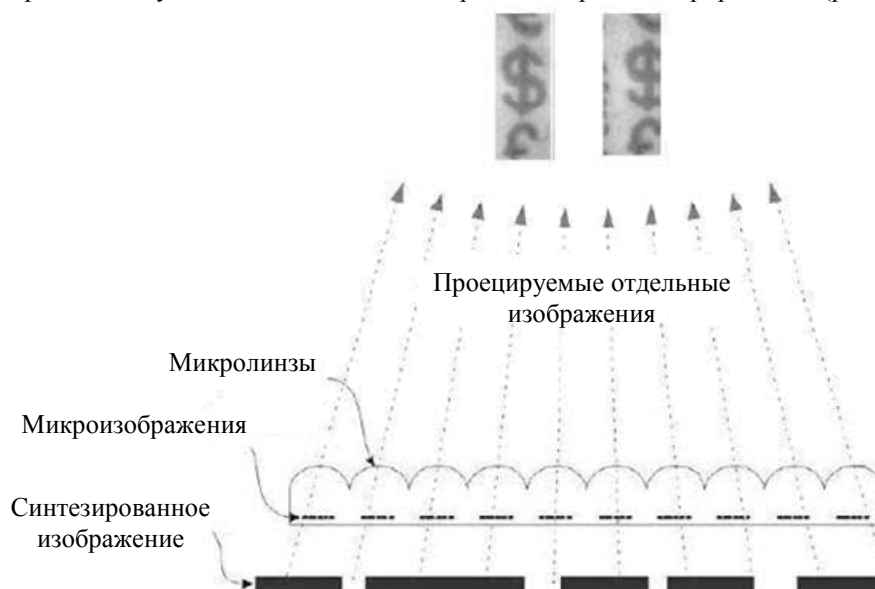


Рис. 1. Формирование «плавающего» изображения решеткой микролинз

В данной схеме пленка толщиной 24 мкм имеет на одной стороне микролинзовый растр, а на другой – микронные изображения. Мнимое изображение формируется за пленкой [1]. При изменении точки наблюдения (или изменении угла наблюдения) становятся видимыми различные части микроизображения, а поскольку видимое изображение оказывается увеличенным и синтезированным из многих элементарных изображений, наблюдается эффект его «движения». Следовательно, для получения «плавающих» изображений необходимо формирование мнимого изображения при использовании микропроекции на базе матрицы микролинз, подобно способу, рассмотренному выше. С учетом требования низкой себестоимости защитных микролинзовых пленочных элементов наиболее эффективным подходом является

вначале изготовление мастер-матрицы микролинз с последующим переносом геометрии на полимерную пленку методом горячего эмбоссинга. В связи с этим в работе исследовался способ создания мастер-матриц для их последующего применения в машинах горячей печати.

Изготовление мастер-матриц решеток микролинз методом термоформования полимерной пленки

Наша технология ориентировалась на использование эмбоссинга на барабане или горячего пресования на прессе как основного метода создания микролинз с использованием металлической матрицы, получаемой методом гальванопластики. Для этого изготавливалась геометрически подобная структура микролинзового раstra на полимерном материале, далее на поверхность проводилось вакуумное напыление металла, который наращивался до нужной толщины гальваническим методом.

Микролинзовый растр, предназначенный для создания моушен-эффекта, должен иметь высокую плотность заполнения (минимальное расстояние между микролинзами) и высокую степень повторяемости фокусного расстояния микролинз в решетке. Исходя из этих требований, для создания решеток был использован эффект деформации поликарбонатной пленки вблизи температуры плавления. Схематично процесс представлен на рис. 2.

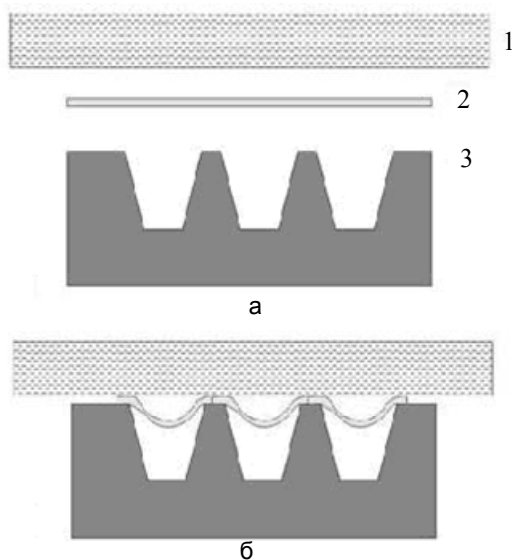


Рис. 2. Формирование микролинз методом термического течения поликарбонатной пленки. Схема формирования: 1 – стекло, прижим; 2 – поликарбонатная пленка; 3 – пуансон, резина (а); сформированная решетка после нагрева (б)

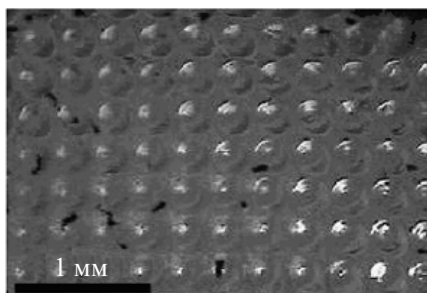


Рис. 3. Микрофотография микролинз

Процесс формирования поверхностей микролинзового раstra основан на течении термопластичной поликарбонатной пленки при температуре ее размягчения. Для формирования требуемой структуры с заданным расположением микролинз методом лазерного испарения формируется растр из глубоких колодцев на черной резине 3. Диаметр колодцев задает желаемый диаметр микролинз, а их шаг – период линз в решетке. Глубина колодцев должна быть максимальной для возможности глубокого формования пленки. В нашем случае использована глубина 150 мкм при диаметре линз 250 мкм. На поверхность перфорированной резины накладывается поликарбонатная пленка 2 (рис. 2, а), которая прижимается к резине толстым стеклом 1. Весь агрегат предварительно, до укладки пленки, нагревается до заданной температуры (190°C). После укладки пленка прогибается в колодцы (рис. 2, б) и формируется решетка полусфер. В зависимости от температуры и времени формования возможно получение полусфер различной глубины.

После окончания процесса и охлаждения пленки она снимается с пуансона. Полученная пленка покрывается антиадгезионным слоем и с нее снимается копия на фотополимере путем заливки жидким фотополимером с последующим фотоотверждением. В результате получаем микролинзовый растр (рис. 3).

Условия эксперимента

В настоящей работе использовался лазерный гравер Laser Graver LG 10F15, обеспечивающий запись структур с разрешением до 2,5 мкм (10160 dpi). Пишущий узел изображен на рис. 4.

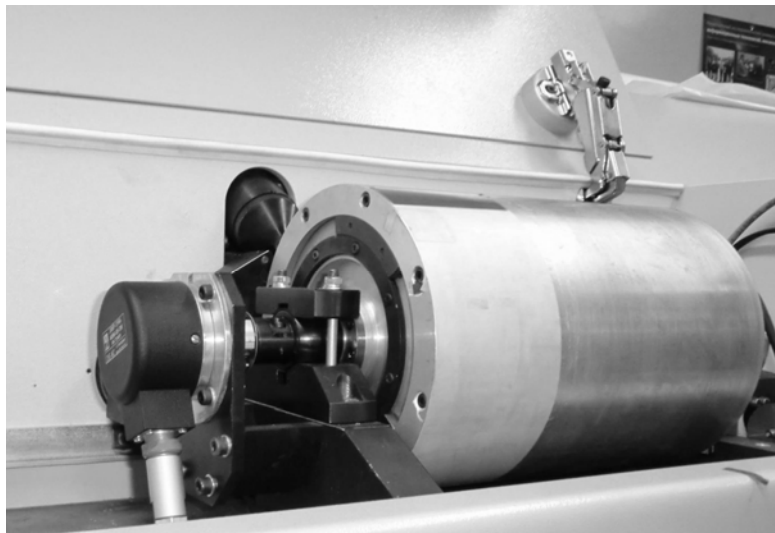


Рис. 4. Фотография барабана лазерного гравера

Лазерный гравер – устройство для записи изображения на полимерной или металлизированной пленке методом прямой абляции посредством частичного испарения поверхностного слоя лучом Nd-YAG непрерывного лазера 1,06 мкм [2]. Точно сфокусированным лучом лазера в нужных участках испаряют поверхность материала и создаются окна, соответствующие пробельным участкам записываемого изображения. Таким образом, на материале формируется изображение.

Обработка резины на лазерном гравере

Обработка резины целесообразна для получения структур большой глубины, вплоть до 1 мм. В данной работе колодцы глубиной 100–150 мкм использовались для получения матрицы микролинз.

При обработке резины основные дефекты связаны с неоднородным составом резины. Наличие крупных частиц сажи вызывает формирование островков на испаряемой поверхности, вследствие чего поверхность получается недостаточно ровной. Однако отсутствие оплавления поверхности позволяет последовательно углублять структуру при последующих проходах луча по одному и тому же месту. В результате возможна многоуровневая обработка с получением трехмерных структур, а также структур большой глубины – до 1 мм.

Моушен-эффект, полученный с использованием микролинзового растра

Микролинзовый растр был получен вышеописанным способом.

Микролинзы прикладываются к бумаге, на которой методом высокой печати нанесены цветные микроизображения, в данном случае – круги, соответствующие размеру и периоду микролинз.

Фотографии моушен-эффекта на микролинзах диаметром 250 мкм с использованием точечного растра показаны на рис. 5. Параметры линз: диаметр 250 мкм, шаг в решетке 290 мкм, фокус 1250 мкм.

На рис. 5 показано синтезированное изображение, полученное от многих линз в решетке. Видимое увеличение определяется расстоянием между бумагой и микролинзовым растром и может варьироваться в широких пределах.

Размеры матриц микролинзового растра, выполненного данным способом в лаборатории, ограничиваются размерами материала, обрабатываемого на лазерном литографе, что составляет 200×200 мм. Такие размеры достаточны для всех практических применений, включая изготовление валиков для эмбоссинг-машины.

В настоящее время были получены образцы линзовых растров с диаметром линз 250 мкм и шагом 250 мкм и 290 мкм. Длина фокуса составила 0,5 мм и 1,2 мм в зависимости от времени термообработки.

Тем же методом был получен растр из цилиндрических линз. В этом случае на резиновой матрице вместо колодцев нарезались щели заданной ширины и шага в решетке. Термически индуцированное продавливание полимерной пленки в щели приводило к образованию периодической структуры цилиндрических линз, которые копировались на фотополимер вышеуказанным способом.

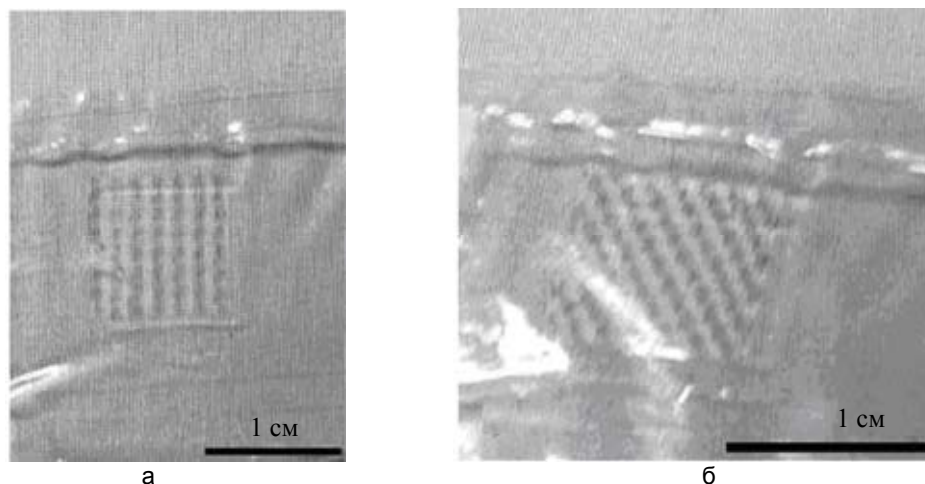


Рис. 5. Моушен-эффект. Фотографии изображения, полученного при совпадении рядов микролинзового растра с рядами микроизображения на бумаге (а) и при повороте массива микролинз (б)

Заключение

Разработан и исследован простой и эффективный способ получения микролинзовых растров с высокой плотностью заполнения поверхности микролинзами. Получены решетки микролинз с различными фокусными расстояниями, обеспечивающие видимый моушен-эффект при изменении точки наблюдения. Однородная яркость изображения показывает, что все микролинзы в матрице имеют одинаковое фокусное расстояние. Показана возможность получения как сферических, так и цилиндрических линз данным методом.

Исследование выполнено в рамках хозяйственной работы (тема № 21034, Гознак «Исследование возможности изготовления на бумажных подложках прозрачных рельефных полимерных структур, создающих визуально изменяющиеся оптические эффекты»).

Литература

1. Yongqi F., Kok B., Ngoi A. Investigation of direct milling of micro-optical elements with continuous relief on a substrate by focused ion beam technology // *Optical Engineering*. – 2000. – V. 39. – № 11. – P. 3008–3013.
2. Баля В.К., Денисюк И.Ю. Формирование микрооптических элементов для защиты с использованием лазерного гравера // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 51–56.

Баля Вера Константиновна	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Vera_Balya@mail.ru
Булгакова Вера Геннадьевна	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vega-bulgakova@yandex.ru
Денисюк Игорь Юрьевич	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, denisiuk@mail.ifmo.ru

УДК 537.876

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОАНТЕНН, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ В АКТИВНОМ СЛОЕ
ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ**

М.Е. Гужва, А.И. Денисюк, Д.В. Пермяков, П.М. Ворошилов, С.И. Франк

Работа посвящена разработке методов изготовления и диагностики металлических нанопленочных солнечных батарей. Описано изготовление экспериментальных образцов одиночных нанопленочных массивов методом фокусированного ионного травления. Подобраны режимы осаждения серебряных пленок малой толщины (50–70 нм) с низкой зернистостью (размер зерен менее 20 нм) на подложки из полупроводниковых материалов. Определены оптимальные дозы ионного травления для золотых и серебряных пленок толщиной 50 нм, при которых достигается соответствие геометрических размеров нанопленочных массивов заданным с точностью ± 10 нм. Полученные структуры нанопленочных массивов исследованы при помощи сканирующей электронной микроскопии и атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме. На изготовленных образцах нанопленочных массивов отработаны уникальные методики бесконтактной ближнепольной оптической микроскопии, позволяющие осуществлять непосредственное измерение локальных электромагнитных полей оптических частот с пространственным разрешением менее 100 нм. Отработаны технологические режимы осаждения малозернистых пленок и ионного травления, методики контроля получаемых нанопленочных массивов будут использованы при изготовлении покрытий из нанопленочных массивов рассматриваемого дизайна для повышения эффективности тонкопленочных солнечных батарей. Также при помощи разработанных методов можно изготавливать и другие планарные золотые и серебряные структуры с высоким разрешением (менее 20 нм) для различных задач в области плазмоники и нанопластики.

Ключевые слова: нанопленочные солнечные батареи, энергоэффективность, атомно-силовая микроскопия, электронная микроскопия.

Введение

В настоящее время разработка тонкопленочных солнечных батарей (СБ) с толщиной активного слоя менее 1 мкм является чрезвычайно актуальной задачей. Связано это с тем, что такие тонкопленочные солнечные элементы можно размещать на гибких подложках и изготавливать с помощью непрерывного процесса рулонной печати [1]. Вместе со снижением удельного расхода полупроводникового материала это ведет к удешевлению таких солнечных батарей по сравнению с традиционными батареями на моно- и поликристаллических пластинах. Кроме того, технология производства тонкопленочных СБ более экологична [2, 3] и за счет малого количества чистого полупроводника на единицу площади солнечного элемента [2] позволяет применять высокоэффективные полупроводниковые материалы, содержащие редкие элементы, например, In и Te. Гибкие и легкие тонкопленочные СБ можно наносить на поверхности сложных форм, что открывает чрезвычайно широкие возможности их использования в промышленных и бытовых назначениях.

Однако фундаментальным физическим ограничением на пути создания высокоэффективных тонкопленочных и ультратонкопленочных СБ является неполное поглощение света в тонком полупроводниковом активном слое. При заданном коэффициенте поглощения полупроводника малая физическая и пропорциональная ей оптическая толщина активного слоя оказывается недостаточной для полного поглощения падающего света. Не поглотившийся в активном слое свет уходит в подложку и, поглощаясь в подложке, вызывает ее дополнительный нагрев, что еще более снижает эффективность работы солнечного элемента. Неполное поглощение света является одной из главных причин более низкого КПД выпускаемых в настоящее время тонкопленочных СБ по сравнению с СБ на основе толстых моно- и поликристаллических полупроводниковых пластин [4].

Для усиления поглощения в активном слое и повышения эффективности тонкопленочных СБ требуется локализация энергии падающего света в тонком (с толщиной порядка длины волны света) слое полупроводника. Такую локализацию называют еще «захватом света».

В СБ с толщиной активного слоя менее 1 мкм в силу ряда физических и технологических ограничений невозможно использовать традиционные методы захвата света – многократное рассеяние на искусственно создаваемом рельефе поверхности и запираение света в оптическом волноводе внутри активного слоя.

Одним из методов локализации световой энергии в малых пространственных областях является преобразование падающей световой волны в локализованные электромагнитные колебания, так называемые «ближние поля». Структуры, которые обеспечивают такое преобразование, в современной литературе называются нанопленочными [5]. Нанопленочные активно изучаются в настоящее время: считается,

что с их помощью можно будет передавать информацию между компонентами оптических чипов, с помощью наноантенн возможна активация и детектирование сигналов одиночных квантовых излучателей. Большинство подобных приложений предъявляет к наноантеннам требования спектральной и поляризационной избирательности, а также узкой диаграммы направленности. Для захвата света и повышения КПД СБ наноантенны, напротив, должны иметь широкий спектральный диапазон работы – несколько сотен нанометров, иметь малые потери и возможность возбуждения неполяризованной плоской волной с произвольным углом падения. В современной научной литературе практически отсутствует информация по широкополосным оптическим наноантеннам с указанными свойствами.

Ранее авторами были рассчитаны оптимальные размеры широкополосных нерезонансных наноантенн, покрытия из которых должны значительно повышать эффективность тонкопленочных СБ двух видов – на основе кремния и на основе CuInSe_2 [6]. В соответствии с численными симуляциями, проведенными в работе, предложенная светоулавливающая структура на основе наноантенн позволяет усилить фотопоглощение в тонком слое кремния на 17% (с учетом спектральной плотности солнечной радиации и спектрального фотоэлектрического отклика полупроводника) по сравнению с тем случаем, когда на поверхность солнечной батареи нанесено обычное антиотражающее покрытие, и на 64%, когда батарея ничем не покрыта. Данный результат свидетельствует о высокой эффективности наноантенн и является наилучшим по сравнению с известными литературными данными для слоя полупроводника не более 150 нм. На рис. 1 представлена схема тонкопленочного солнечного элемента с особым наноструктурированным покрытием, осуществляющим захват и концентрацию света.

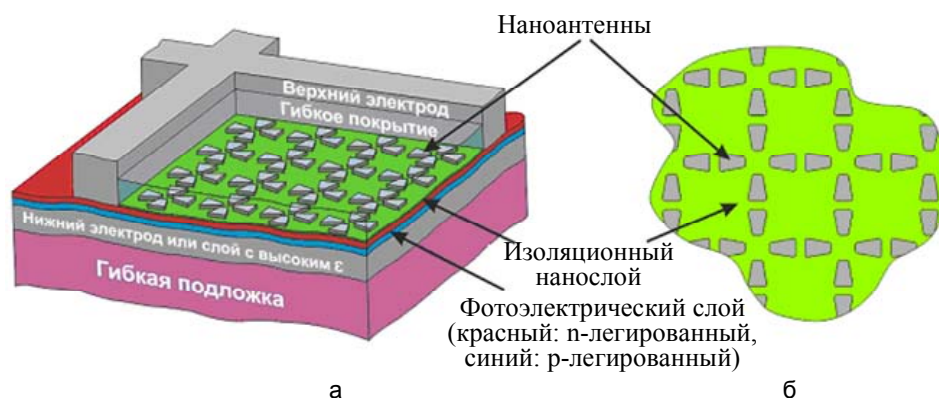


Рис. 1. Схема тонкопленочного солнечного элемента с покрытием из наноантенн (а); вид сверху на массив наноантенн (б)

В данной работе приводятся экспериментальные результаты по созданию этих наноантенн методом фокусированного ионного травления (ФИТ) и их исследования при помощи электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Материалы и методы

В качестве подложек для изготовления наноантенн использовались покупные подложки из кремния (Si), аморфного кварца (SiO_2), кремния на изоляторе (SOI) и арсенида галлия (GaAs). Исходный диаметр подложек варьировался от 50,8 до 101,6 мм. После напыления металла подложки разрезались или раскалывались на образцы площадью порядка 1 см^2 .

Подложки из GaAs, отвечающие требованиям применимости в процессах эпитаксии и имеющие наиболее качественную полировку поверхности, использовались в качестве эталонных по шероховатости для изучения структуры наносимых металлических слоев – зернистости, максимальных размеров поверхностных кластеров и их влияния на качество наноантенн.

Известно, что получение тонких (10–50 нм) однородных пленок серебра с малой зернистостью и стабильными свойствами достаточно проблематично. В силу этого обстоятельства большинство экспериментальных металлических структур для плазмоники и нанопотоники традиционно изготавливается на основе золотых металлических пленок, несмотря на то, что «плазмонные» параметры (соотношение вещественной и мнимой частей диэлектрической проницаемости) для золота в видимом диапазоне частот хуже, чем у серебра. Исходя из этого обстоятельства, параллельно с отработкой технологии изготовления серебряных наноантенн на начальных этапах проводились эксперименты по изготовлению макетов наноантенн из золота с целью отладки общих технологических этапов наноструктурирования и постановки экспериментальных методик для оценки качества наноантенн.

Для получения металлических покрытий толщиной 50 нм были опробованы следующие методы вакуумного осаждения: магнетронное напыление, напыление при помощи электронно-лучевого распыления мишени, напыление распылением мишени ионным пучком, резистивно-термическое напыление.

На рис. 2 приведены фотографии кремниевых подложек с нанесенными металлическими пленками золота (рис. 2, а) и серебра (рис. 2, б), полученные методом электронно-лучевого распыления мишени.



Рис. 2. Кремниевая подложка с металлическими пленками толщиной 50 нм, полученными электронно-лучевым распылением мишени: золото (а); серебро (б). Диаметр образцов 50,8 мм

На рис. 3, 4 показаны электронные изображения поверхности золотых и серебряных пленок, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Метод электронно-лучевого распыления требует некоторой адаптации и подбора режимов для снижения зернистости получаемых покрытий, что и было предпринято в дальнейшем. Продемонстрировано, что при одинаковых режимах нанесения качество серебряных пленок гораздо хуже, чем золотых, что потребовало дополнительной оптимизации режимов напыления.

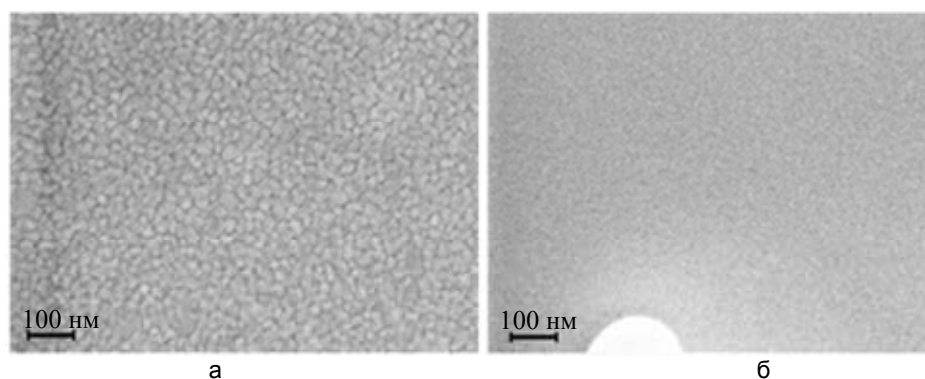


Рис. 3. Изображения поверхности золотой пленки толщиной 50 нм в электронном микроскопе: электронно-лучевое распыление мишени (а); магнетронное напыление (б)

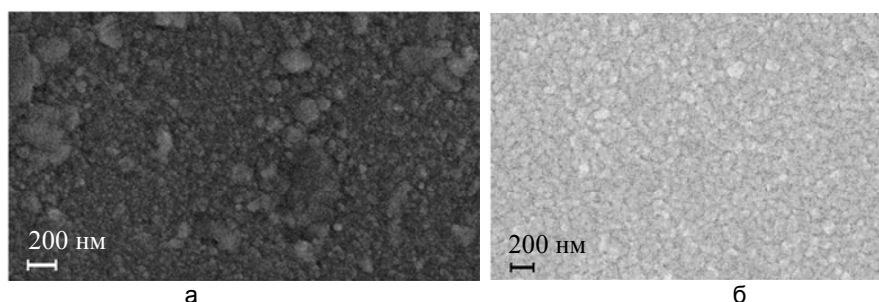


Рис. 4. Изображения поверхности серебряной пленки толщиной 50 нм в электронном микроскопе: электронно-лучевое распыление мишени (а); магнетронное напыление (б)

Для получения серебряных пленок с низкой зернистостью была проведена серия экспериментов по нанесению серебра на гладкие подложки из GaAs. На рис. 5 показаны СЭМ-изображения поверхности пленок, нанесенных в различных режимах, с различными скоростями – от 0,05 нм/с до 0,5 нм/с. На рис. 6 изображены участки этих пленок, полученные детектором вторичных электронов, расположенным под углом 45° к поверхности пленок. На этих изображениях более четко виден поверхностный рельеф изучаемых пленок.

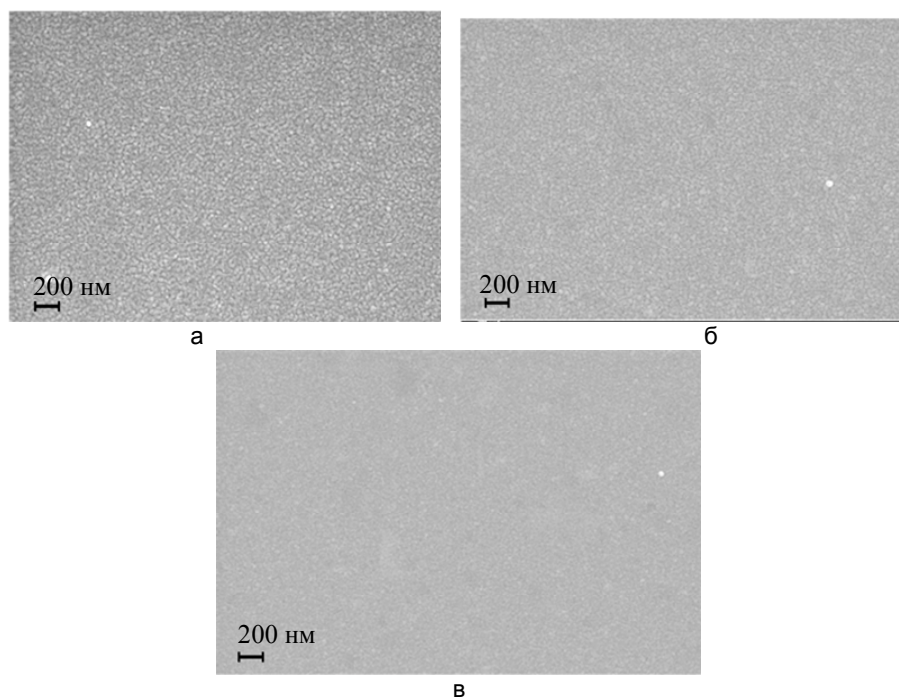


Рис. 5. СЭМ-изображения серебряных пленок на подложках GaAs, нанесенных в различных режимах. Скорости напыления: 0,05 нм/с (а); 0,2 нм/с (б); 0,5 нм/с (в)

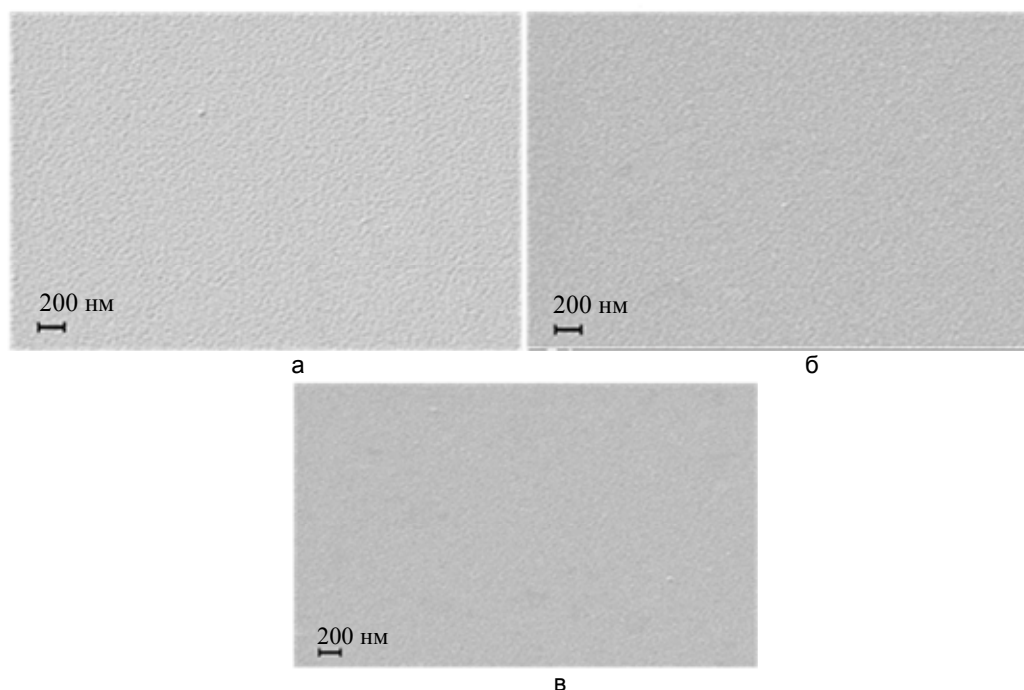


Рис. 6. СЭМ-изображения под углом 45° к поверхности серебряных пленок на подложках GaAs, напыленных в различных режимах. Скорости напыления: 0,05 нм/с (а); 0,2 нм/с (б); 0,5 нм/с (в)

Изготовление одиночных наномантенн

Изготовление экспериментальных образцов наномантенн проводилось методом фокусированного ионного травления (ФИТ), также называемым методом ионно-лучевой фрезеровки (ИЛФ). Были изготовлены образцы с одиночными наномантеннами и матрицы наномантенн 3×3 толщиной 50 нм из золота и серебра. Все эксперименты по изготовлению наномантенн проводились на установке электронно-ионной литографии Neon 40 компании Carl Zeiss, оснащенной ионной колонной модели Canion производства компании Orsay Physics.

Для ИЛФ использовался пучок ионов Ga⁺, ускоряющее напряжение составляло около 30 кВ, а ток пучка варьировался от 5 до 10 пА. Ионный пучок экспонировал согласно заданному шаблону область,

представляющую собой квадраты со стороной 1 мкм в случае одиночных антенн и 3 мкм в случае матриц антенн 3×3. При движении ионного пучка за счет ионного распыления происходило удаление металла на всех участках области сканирования, за исключением элементов наноматрицы. Путем экспериментального подбора были определены дозы экспонирования, при которых полностью удалялся слой золота, но еще не был затронут материал подложки. Для слоя золота толщиной 50 нм эти значения доз составили 15000–20000 мкА·с/см². Шаг перемещения ионного пучка составлял 10 нм, использовалось растровое экспонирование.

При отработке технологии создания наноматрицы в этой же установке, не вынимая образец из вакуумной камеры, делались предварительные изображения антенн методом СЭМ. Учитывая относительный наклон осей ионной и электронной колонн, образец был наклонен к электронному лучу под углом около 45°. Ускоряющее напряжение электронного луча составляло 5 кВ, для получения изображения использовался детектор вторичных электронов. На рис. 7 показаны пробные области со сплошной фрезеровкой при различных дозах экспонирования, а также изображение границы области фрезеровки после удаления золота на всю толщину.

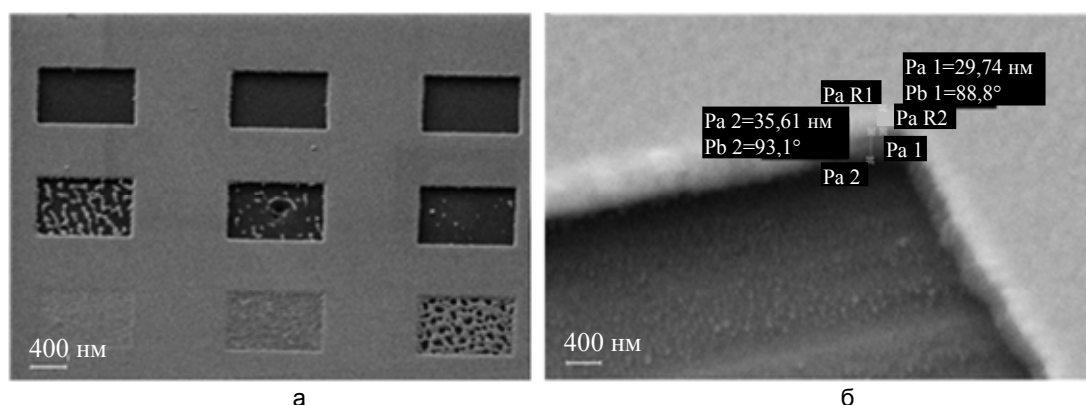


Рис. 7. СЭМ-изображение областей после ионной фрезеровки с различными дозами экспонирования (а); СЭМ-изображение границы области фрезеровки золотой пленки под углом 45° (б)

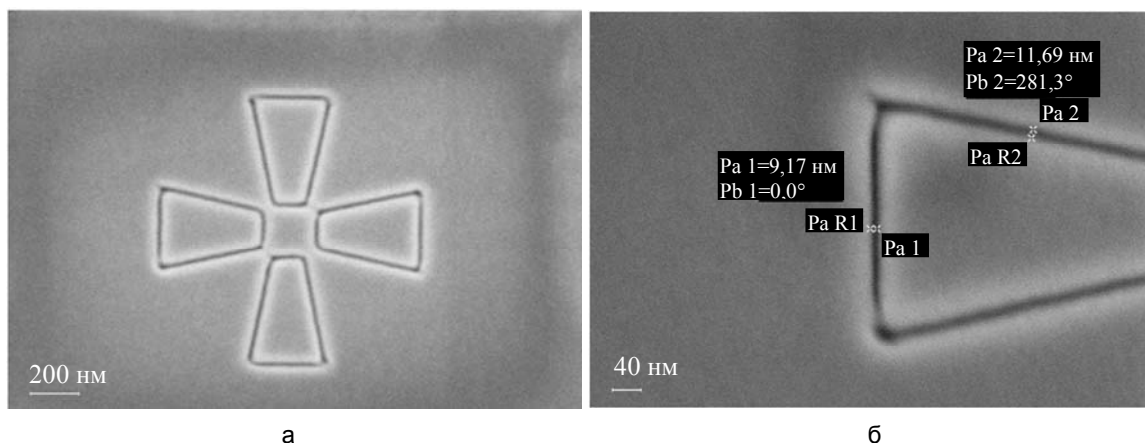


Рис. 8. СЭМ-изображение контуров нанодипольной антенны, полученных методом ИЛФ в режиме наилучшего разрешения (а); в увеличенном масштабе (б)

Метод ИЛФ при небольших токах позволяет достигать при наноструктурировании планарного разрешения до 8 нм. Это продемонстрировано на рис. 8, где показаны линии контуров нанодипольной антенны, полученной при сканировании ее ионным пучком.

Электронные изображения одиночной нанодипольной антенны приведены на рис. 9. При первых экспериментах по получению одиночных нанодипольных антенн использовалось однопроходное сканирование «снизу вверх». Однако в этом случае наблюдался эффект переосаждения распыляемого металла на область подложки, уже подвергнутой экспонированию. Это заметно по неровной границе всех «верхних» краев элементов антенны (рис. 9, а). По этой причине в дальнейших экспериментах применялся режим двухпроходного сканирования («снизу вверх» и «сверху вниз»), при этом доза экспонирования в каждом проходе составляла половину величины полной дозы. Изображение структуры нанодипольной антенны после первого прохода ионным пучком показано на рис. 10. Этот режим позволил избавиться от эффекта переосаждения распыляемого материала (рис. 9, б).

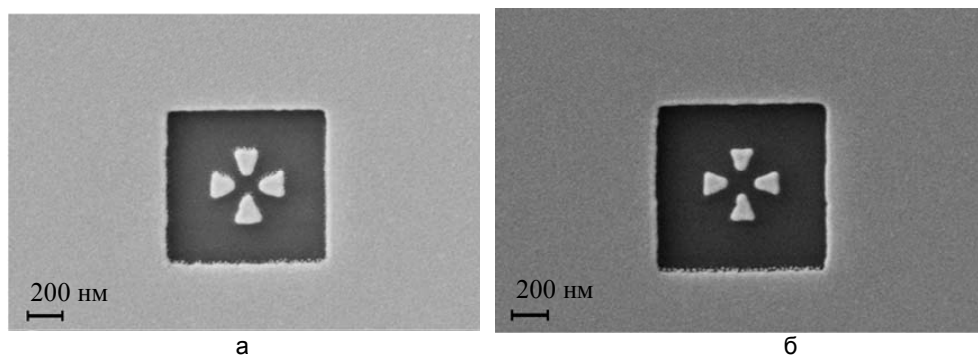


Рис. 9. СЭМ-изображение одиночной nanoантенны, полученной методом ИЛФ: за один проход с большой дозой (а); за два прохода с меньшими дозами (б)

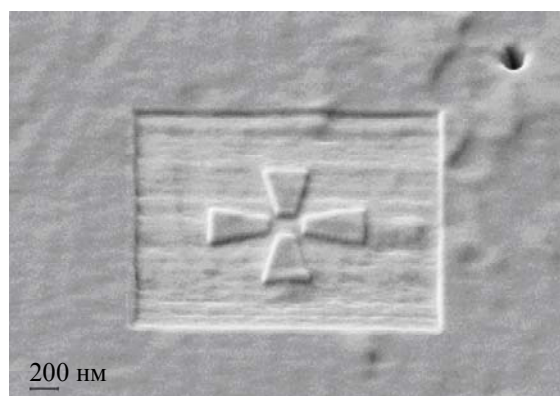


Рис. 10. СЭМ-изображение структуры одиночной nanoантенны, получаемой методом двухпроходного экспонирования с меньшими дозами, после первого прохода

На рис. 11 приведены СЭМ- и АСМ-изображения матрицы 3×3 из золотых nanoантенн, полученной методом ИЛФ.

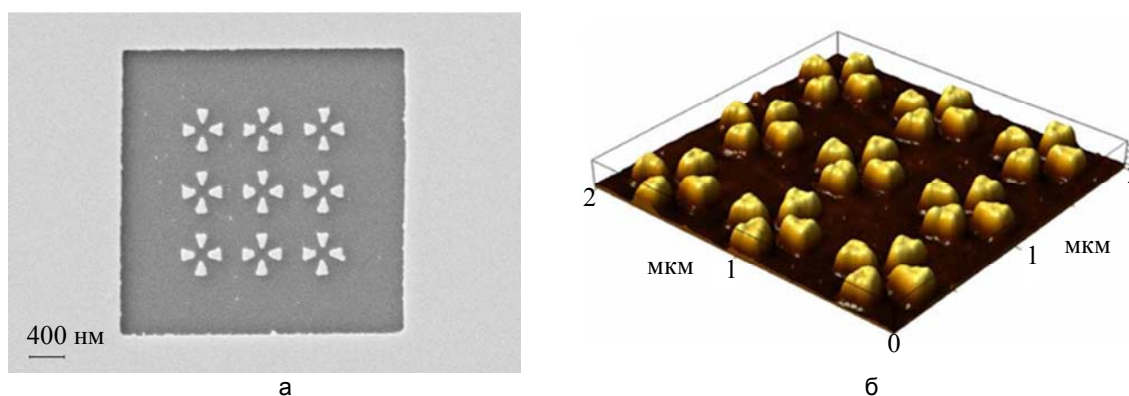


Рис. 11. СЭМ-изображение матрицы 3×3 из золотых nanoантенн на подложке Si^{+20} нм SiO_2 (а); АСМ-изображение матрицы золотых nanoантенн 3×3, полученных методом ИЛФ (б)

В дальнейшем, полученные методом ИЛФ образцы с золотыми nanoантеннами использовались для постановки методик АСМ.

В процессе отработки технологии нанесения пленок серебра с малой зернистостью были изготовлены серебряные nanoантенны и их массивы. Было обнаружено, что распыление серебра идет по зернам и, несмотря на высокое разрешение самого метода ИЛФ, разрешение получаемой структуры определяется зернистостью исходной пленки. На рис. 12 показано изображение матриц 3×3 серебряных nanoантенн, полученных в процессе подбора оптимальных режимов экспонирования.

На рис. 13 показаны изображения матрицы серебряных антенн в электронном (рис. 13, а) и атомно-силовом (рис. 13, б) микроскопах. В целом качество серебряных nanoантенн, получаемых этим методом, оказывается хуже, чем золотых. Это связано с качеством исходных пленок и, возможно, с более высокой скоростью травления серебра и его «мягкостью» под ионным пучком, что приводит к более размытым границам получаемых элементов.

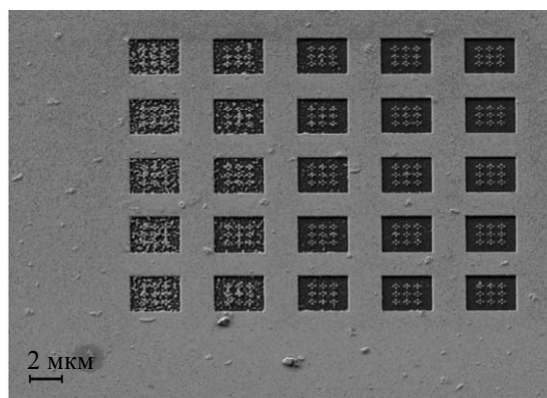


Рис. 12. СЭМ-изображение матриц серебряных nanoантен 3×3, полученных методом ИЛФ при различных дозах экспонирования

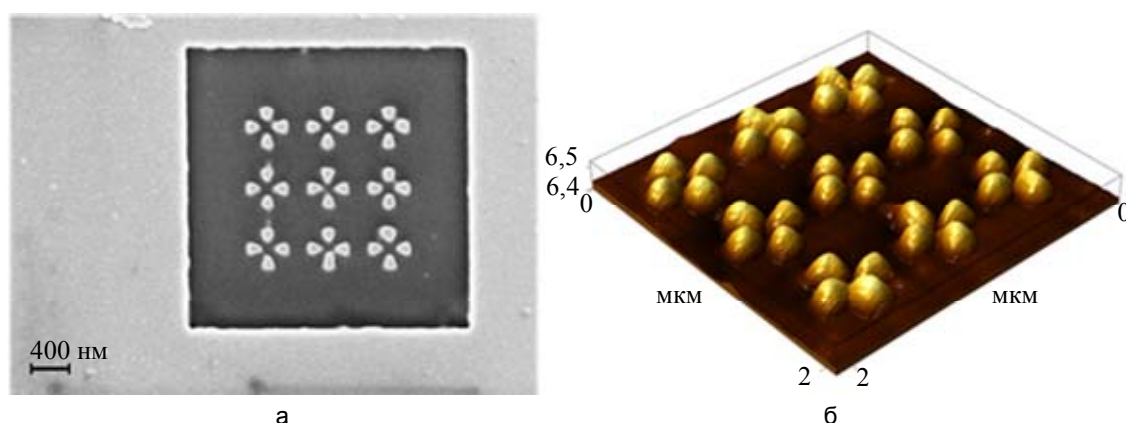


Рис. 13. СЭМ-(а) и АСМ-изображения (б) матриц серебряных nanoантен 3×3, полученных методом ИЛФ

В последующем были проведены опыты по изготовлению более крупных массивов nanoантенн (в частности, матриц 5×5 и 10×10) при помощи метода ИЛФ. Время экспонирования таких структур исчисляется уже часами, а сложности, связанные с поддержанием точности положения образца и с пересаживанием металла, сильно возрастают. В связи с этим для изготовления покрытий из nanoантенн на больших поверхностях метод ФИТ, по всей видимости, имеет ограниченное применение. Тем не менее, подобранные при изготовлении макетов nanoантенн режимы ионного травления могут быть использованы при изготовлении покрытий из nanoантенн при помощи электронной или нанолитографии в сочетании с последующим ионно-плазменным травлением. На полученных образцах с nanoантеннами авторами были отработаны уникальные методики бесконтактной атомно-силовой и ближнепольной оптической микроскопии, описание которых, к сожалению, не может быть приведено в объеме настоящей работы.

Заключение

Изготовлены экспериментальные образцы золотых и серебряных nanoантенн, предназначенных для использования в качестве покрытий для улавливания света в тонкопленочных солнечных батареях с целью увеличения их эффективности. Геометрические характеристики nanoантенн исследованы с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии. Определены оптимальные режимы ионного травления для золотых и серебряных пленок толщиной 50 нм. Определены оптимальные режимы осаждения серебра для получения пленок с малой зернистостью и шероховатостью поверхности.

Исследования выполнены в НИУ ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.В37.21.0307, государственный контракт № 11.519.11.2037, договор 11.G34.31.0020) и фонда «Династия».

Литература

1. Ultra-Low-Cost Solar Electricity Cells, An Overview of Nanosolar's Cell Technology Platform, Nanosolar. – White Paper – September 2, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.catharinafonds.nl/wp-content/uploads/2010/03/NanosolarCellWhitePaper.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.05.2013).
2. Marti A. and Luque A. Next-generation photovoltaics. – Institute of Physics Publishing, Bristole-Philadelphia, 2004. – 344 p.

3. Nelson J. The Physics of Solar Cells. – Imperial College Press, 2003. – 363 p.
4. Путилин Э.С., Немкова А.А., Выбор оптимального просветляющего покрытия для задач солнечной энергетики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 13 (58). – С. 22–26.
5. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны: Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
6. Simovski C.R., Morits D.K., Voroshilov P.M., Guzhva M.E., Belov P.A. and Kivshar Yu.S. Enhanced Efficiency of Light-Trapping Nanoantenna Arrays for Thin-Film Solar Cells. – Submitted to Optics Express, 2013. – 12 p.

- Гужва Михаил Евгеньевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, m.guzhva@phoi.ifmo.ru
- Денисюк Андрей Игоревич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, denisiuk@mail.ifmo.ru
- Пермяков Дмитрий Вадимович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, d.permyakov@phoi.ifmo.ru
- Ворошилов Павел Михайлович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, pavel.voroshilov@phoi.ifmo.ru
- Франк Софья Игоревна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Sur-ok@yandex.ru

УДК 621.313.39.001.5

ПУЛЬСАЦИИ МОМЕНТА УНИПОЛЯРНОГО МНОГОПОЛЮСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

О.К. Епифанов, И.А. Салова, Ю.В. Гречушкин

Рассмотрена физико-математическая модель обесточенного трехфазного униполярного многополюсного электродвигателя с постоянными магнитами, получены эквивалентные схемы замещения магнитной цепи, выведены аналитические выражения, описывающие возникновение и изменения остаточного момента. Установлено, что остаточный момент вызван наличием и взаимодействием друг с другом высших гармоник магнитной проводимости воздушного зазора, образованного его зубчатыми статором и ротором. Остаточный момент является знакопеременной функцией, изменяющейся от угла поворота ротора электродвигателя с периодичностью доминирующей шестой гармоники на угловом интервале полюсного деления. Определено и аналитически показано, что угловое отклонение от заданного разворота зубчатых роторов друг относительно друга, обеспечивающего униполярное распределение магнитного потока в конструкции электродвигателя, вызывает появление третьей гармоники в изменении остаточного момента.

Ключевые слова: униполярный моментный электродвигатель, пульсации, остаточный момент, спектральный состав, двухсторонняя зубчатость, магнитная проводимость воздушного зазора.

Введение

Современные высокоточные безредукторные следящие электроприводы для различных по назначению прецизионных приборов наблюдения и ориентации в подвижных объектах [1–6] выполняются на основе многополюсных моментных электродвигателей различных типов с возбуждением магнитным полем от высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ) [4–8], среди которых получили распространение высокоэффективные индукторные моментные электродвигатели униполярного типа (МД) [7–10].

Общим недостатком указанных МД является наличие пульсаций момента, основным источником возникновения которых является остаточный момент (момент «залипания») при отсутствии тока в обмотках управления [2, 6, 11–15]. Эти пульсации развиваемого электродвигателем вращающего момента выступают в роли переменного возмущающего воздействия в процессе работы безредукторного следящего электропривода, тем самым снижая точностные параметры прецизионных приборов в целом [1–3, 6, 13, 14]. В рассматриваемых МД остаточный момент и соответственно указанные пульсации развиваемого момента по величине ниже, чем в моментных электродвигателях некоторых других типов [4, 7, 8, 11–15], однако достижение более высокого уровня точностных параметров в ряде прецизионных систем предполагает существенное снижение его величины. В этом случае весьма важно для рассматриваемого типа МД определение аналитической модели, описывающей возникновение остаточного момента и характера его изменения в функции угла поворота ротора, а также определение влияющих на его величину и спектральный состав свойств и параметров конструкции.

Модель обесточенного индукторного униполярного электродвигателя

Известно, что создаваемые в МД моменты преимущественно определяются геометрией его рабочего воздушного зазора [7–9, 15], поскольку конструкции статора и ротора МД принципиально являются явнополюсными и образуют двухстороннюю зубчатость в его рабочем воздушном зазоре.

Исходя из принципиального построения трехфазного МД [9, 10, 16], его эквивалентная магнитная аксиальная модель и соответствующая ей схема замещения магнитной цепи обесточенного МД могут быть представлены так, как это показано соответственно на рис. 1 и 2, где приняты следующие обозначения: 1 – статор; 2 – сосредоточенная трехфазная обмотка статора; 3 – воздушный зазор между ротором и статором; 4 – правый и левый магнитопроводы ротора; 5 – аксиально намагниченный высококоэрцитивный ПМ; L_c – осевая длина статора; l_p' и l_p'' – соответственно осевая длина правого и левого ротора ($l_p' = l_p''$); t_m – толщина ПМ в направлении намагничивания S–N; δ – величина воздушного зазора; $\lambda'_k, \lambda'_{k+1}, \lambda'_{k-1}$ и $\lambda''_k, \lambda''_{k+1}, \lambda''_{k-1}$ – соответственно магнитная проводимость воздушного зазора (МПВВ) под тремя полюсами правого и левого магнитопроводов ротора (правой и левой половины МД); Φ_j – часть магнитного потока ПМ, проходящего через соседние полюса и ярмо статора; Φ_k – часть магнитного потока ПМ, замыкающегося поперечно через зубцы и полюс статора и не проходящего через ярмо статора; Φ_m – магнитный поток ПМ ($\Phi_m = \Phi_j + \Phi_k$); F'_m и R'_m – эквивалентные магнитодвижущая сила (МДС) и магнитное сопротивление ПМ: $F'_m = F_m/k_\sigma$; $R'_m = R_m/k_\sigma$, где k_σ – коэффициент рассеяния магнитного потока ПМ; R_j – магнитное сопротивление ярма статора; R_k – поперечное магнитное сопротивление полюса статора. Для обеспечения создания униполярного магнитного потока в МД зубчатые магнитопроводы ротора, между которыми располагаются ПМ, развернуты друг относительно друга на половину полюсного деления (180 эл. градусов).

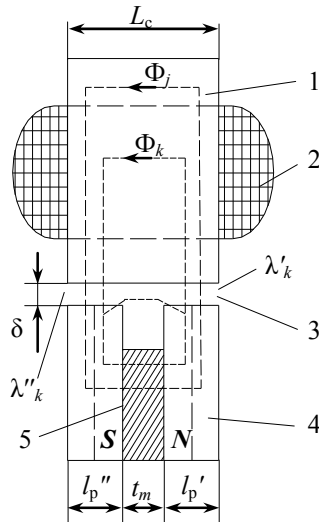


Рис. 1. Аксиальная магнитная модель МД

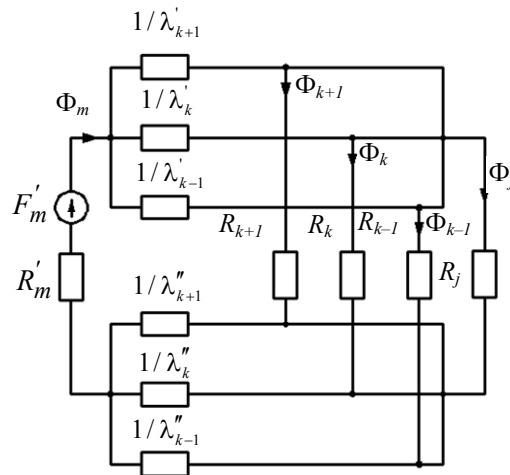


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи МД

Исходя из традиционных допущений, функция МПВВ от угла поворота ротора α в рассматриваемом МД при разложении ее в ряд Фурье описывается, согласно [7, 8, 15, 16], постоянной составляющей и первой гармоникой. Однако, как будет показано ниже, такие допущения не выявляют истинных причин появления остаточного момента и соответственно пульсаций момента МД.

Представим функцию МПВВ без ограничения числа учитываемых i -х гармонических составляющих следующим образом:

– для правой половины ротора МД (рис. 1)

$$\lambda'_k = \lambda_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i \cos \left[i \cdot \left(z_2 \alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right) \right] \right); \quad (1)$$

– для левой половины ротора МД (рис. 1)

$$\lambda''_k = \lambda_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \mu_i \cos \left[i \cdot \left(z_2 \alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \pi \right) \right] \right), \quad (2)$$

где z_2 – число зубцов на каждом магнитопроводе ротора; $k = 0, 1, 2$ – номер фазы статора МД; λ_0 – постоянная составляющая ПВВ; $\mu_i = \lambda_i / \lambda_0$ – относительные значения гармонических составляющих МПВВ МД (отношение амплитуд к постоянной составляющей); i – номер гармоники.

Суммируя $\sum_{k=0}^2 \lambda'_k$ и $\sum_{k=0}^2 \lambda''_k$ по двенадцати первым гармоникам МПВВ согласно (1) и (2) под тремя

полюсами статора, нетрудно убедиться, что для рассматриваемых МД указанные МПВВ содержат гармоники, только кратные числу его фаз – трем. Для остальных гармоник эти суммы равны нулю. Тогда с учетом числа полюсов статора (1) и (2) представим в следующем виде:

$$\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda'_k = p\lambda_0 (1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha + \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha); \quad (3)$$

$$\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda''_k = p\lambda_0 (1 - \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha - \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha). \quad (4)$$

Эквивалентная схема замещения магнитной цепи МД для дальнейшего определения магнитных потоков, МДС и остаточного момента МД может быть представлена, с учетом (3) и (4), в виде, приведенном на рис. 3.

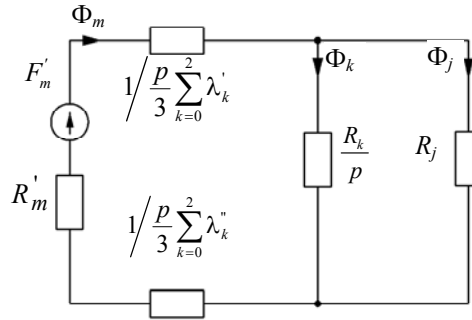


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи МД

Тогда выражение для эквивалентного сопротивления R_3 воздушного зазора МД может быть записано как

$$R_3 = \left(\frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda'_k} \right) + \left(\frac{1}{\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda''_k} \right) + R_{jk} \quad \text{при} \quad R_{jk} = \frac{R_j R_k / p}{R_j + R_k / p} = \frac{R_j}{1 + pR_j / R_k}. \quad (5)$$

Поскольку величина R_{jk} в (5) более чем на два порядка меньше суммарной величины R_3 , то в дальнейших расчетах R_{jk} не учитывается. Следовательно, выражение (5), с учетом (3) и (4), примет вид:

$$R_3 \approx \frac{1}{p\lambda_0} \left(\frac{1}{1 + \mu_3 \cos(3z_2\alpha) + \mu_6 \cos(6z_2\alpha) + \mu_9 \cos(9z_2\alpha) + \mu_{12} \cos(12z_2\alpha)} \right) + \frac{1}{p\lambda_0} \left(\frac{1}{1 - \mu_3 \cos(3z_2\alpha) + \mu_6 \cos(6z_2\alpha) - \mu_9 \cos(9z_2\alpha) + \mu_{12} \cos(12z_2\alpha)} \right). \quad (6)$$

Магнитный поток ПМ Φ_m и энергия магнитного поля W_m в магнитной цепи МД, согласно [4, 7, 16, 17], определяется как

$$W_m = \frac{1}{2} \Phi_m^2 (R'_m + R_3) = F_m'^2 / 2(R'_m + R_3), \quad (7)$$

где $\Phi_m = F'_m / (R'_m + R_3)$; $F'_m = \frac{F_m}{k_\sigma} = \frac{h_m H_c}{k_\sigma}$; $R'_m = \frac{R_m}{k_\sigma} = \frac{h_m H_c}{k_\sigma S_m B_r}$; $k_\sigma = 1 + \frac{R_m}{R_\delta}$; R_δ – магнитное сопротивление воздушного зазора (вычисление k_σ и R_δ приведено в [16, 18]); h_m и S_m – соответственно толщина и площадь ПМ в направлении намагничивания; H_c и B_r – соответственно коэрцитивная сила и остаточная индукция ПМ.

Остаточный момент МД определим как производную магнитной энергии по углу поворота ротора α МД при постоянном значении МДС ПМ, т.е. $M_{ост} = \frac{dW_m}{d\alpha} \Big|_{F'_m=const}$. Допустимость принятия значения

МДС постоянной величиной является обоснованной [7, 15, 18], поскольку в рассматриваемом типе МД конструктивно обеспечивается постоянство рабочей точки ПМ, а при наличии токов в фазах обмотки статора их влияние на магнитный поток ПМ (реакция якоря) отсутствует.

Выразим остаточный момент МД с учетом (7) через параметры эквивалентной схемы замещения магнитной цепи МД, приведенной на рис. 3:

$$M_{ост} = \frac{dW_m}{dR_3} \cdot \frac{dR_3}{d\alpha} = -\frac{1}{2} F_m'^2 \frac{1}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{dR_3}{d\alpha}. \quad (8)$$

Выражение для производной эквивалентного сопротивления воздушного зазора по углу поворота ротора МД с учетом (6) имеет вид

$$\frac{dR_3}{d\alpha} = \frac{3z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha + 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha + 3\mu_9 \sin 9z_2\alpha + 4\mu_{12} \sin 12z_2\alpha}{(1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha + \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha)^2} \right) - \frac{3z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha - 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha + 3\mu_9 \sin 9z_2\alpha - 4\mu_{12} \sin 12z_2\alpha}{(1 - \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha - \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha)^2} \right). \quad (9)$$

Тогда выражение для остаточного момента МД в общем виде при подстановке (9) в (8) запишется как

$$M_{\text{ост}} = \frac{F_m'^2}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{3z_2}{2p\lambda_0} \cdot \left\{ \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha + 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha + 3\mu_9 \sin 9z_2\alpha + 4\mu_{12} \sin 12z_2\alpha}{(1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha + \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha)^2} \right) - \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha - 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha + 3\mu_9 \sin 9z_2\alpha - 4\mu_{12} \sin 12z_2\alpha}{(1 - \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha - \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha)^2} \right) \right\}. \quad (10)$$

Поскольку знаменатели в круглых скобках (9) мало отличаются от единицы, то выражение (9) может быть записано в виде

$$\frac{dR_3}{d\alpha} \approx \frac{12z_2 \cdot (\mu_6 \cdot \sin 6z_2\alpha + 2\mu_{12} \cdot \sin 12z_2\alpha)}{p\lambda_0}. \quad (11)$$

Далее, подставляя (11) в (8), получим следующее выражение:

$$M_{\text{ост}} = -\frac{F_m'^2}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{6z_2}{p\lambda_0} (\mu_6 \cdot \sin 6z_2\alpha + 2\mu_{12} \cdot \sin 12z_2\alpha). \quad (12)$$

Из (12) следует, что функция остаточного момента МД является гармонической и в общем случае содержит шестую и двенадцатую гармоники. В первом приближении будем считать, что двенадцатая гармоника имеет второй порядок малости, тогда выражение (12) может быть записано в виде

$$M_{\text{ост}} \approx -\frac{F_m'^2}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{6z_2 \cdot \mu_6}{p\lambda_0} \sin 6z_2\alpha. \quad (13)$$

Как следует из (6) и как показано в [7, 15], при отсутствии высших гармонических составляющих в функции МПВВ эквивалентное сопротивление воздушного зазора постоянно и равно $R_3 = 2/p\lambda_0$, а, следовательно, изменение остаточного момента во всем диапазоне углов поворота ротора МД отсутствует.

Исследование влияния гармоник магнитной проводимости воздушного зазора на остаточный момент индукторного униполярного электродвигателя

Проведем отдельный анализ влияния на гармонический состав функции остаточного момента МД различных гармонических составляющих МПВВ.

Для оценки влияния первой и третьей гармоник МПВВ соответствующее выражение для остаточного момента МД получим следующим образом. Представим функцию (1) для правой половины ротора МД как

$$\lambda'_k = \lambda_0 + \lambda_1 \cos \left[z_2\alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \lambda_2 \cos \left[2z_2\alpha - (k-1) \frac{4\pi}{3} \right] + \lambda_3 \cos 3z_2\alpha, \quad (14)$$

а функцию (2) для левой половины ротора МД – как

$$\lambda''_k = \lambda_0 - \lambda_1 \cos \left[z_2\alpha - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] - \lambda_2 \cos \left[2z_2\alpha - (k-1) \frac{4\pi}{3} \right] - \lambda_3 \cos 3z_2\alpha. \quad (15)$$

Далее по аналогии с (3)–(9) для (14) и (15) получим:

$$\frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda'_k = p\lambda_0 (1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha), \quad \frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda''_k = p\lambda_0 (1 - \mu_3 \cos 3z_2\alpha);$$

$$R_3 = \left(1 / \frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda'_k \right) + \left(1 / \frac{p}{3} \sum_{k=0}^2 \lambda''_k \right) + R_{jk} = R_{jk} + \frac{2}{p\lambda_0 (1 - \mu_3^2 \cos^2 3z_2\alpha)};$$

$$\frac{dR_3}{d\alpha} = -\frac{12}{p \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \mu_3^2 \cos^2 3z_2\alpha)^2} \cdot \mu_3^2 \cdot z_2 \cdot \cos 3z_2\alpha \cdot \sin 3z_2\alpha. \quad (16)$$

Так как в (16) $2 \cos 3z_2\alpha \cdot \sin 3z_2\alpha = \sin 6z_2\alpha$, а $\mu_3^2 \cos^2 3z_2\alpha$ значительно меньше единицы, с учетом (8) получим, что

$$\frac{dR_3}{d\alpha} = -\frac{6z_2 \cdot \mu_3^2 \cdot \sin 6z_2\alpha}{p\lambda_0}; \quad (17)$$

$$M_{\text{ост.1,3}} \approx \frac{F_m'^2}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{3z_2 \cdot \mu_3^2}{p\lambda_0} \sin 6z_2\alpha. \quad (18)$$

Из (17) и (18) следует, что при наличии только первой и третьей гармоник МПВВ остаточный момент МД изменяется по синусоидальному закону в функции угла поворота ротора с шестикратной периодичностью на полюсном делении.

Аналогично (6) и (9), при наличии первой, третьей и шестой гармоник в функции МПВВ выражение для производной R_3 запишется в виде

$$\frac{dR_3}{d\alpha} = \frac{3z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha + 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha}{(1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha)^2} - \frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha - 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha}{(1 - \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha)^2} \right). \quad (19)$$

Учитывая, что знаменатели в круглых скобках в (19) незначительно отличаются от единицы, в соответствии с (9) остаточный момент МД определится как

$$M_{\text{ост.1,3,6}} = -\frac{F_m'^2}{(R'_m + R_3)^2} \cdot \frac{6z_2 \cdot \mu_6}{p\lambda_0} \sin 6z_2\alpha. \quad (20)$$

На рис. 4 представлены результаты численных расчетов зависимостей остаточного момента МД в функции электрического угла поворота его ротора $z_2 \cdot \alpha$ в процентах от пускового момента по выражениям (10), (18) и (20) для отрезка ряда типовых конструкций МД [8, 9, 16] с параметрами зубцовой зоны ротора $k_{zP} = 0,5$ и статора $k_{zC} = 0,4$.

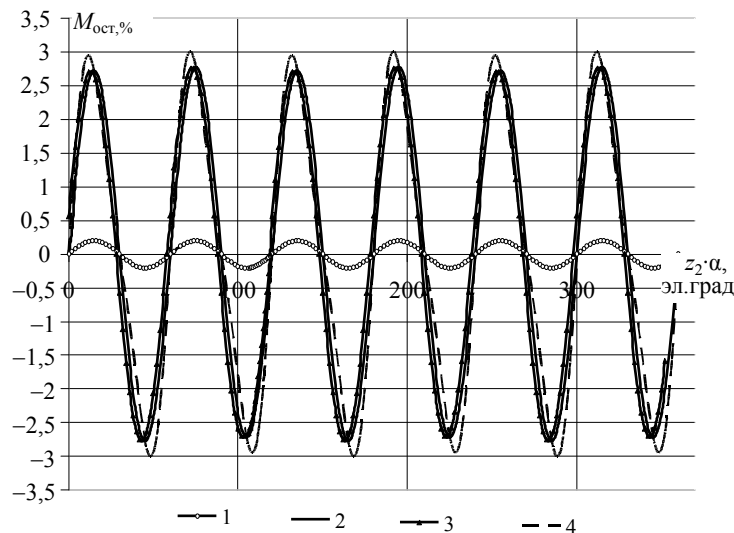


Рис. 4. Функция остаточного момента МД при учете различных гармонических составляющих МПВВ: 1 – 3 гармоники; 2 – 3 и 6 гармоник; 3 – 3, 6 и 9 гармоник; 4 – 3, 6, 9 и 12 гармоник

Из вышеизложенного и полученных результатов расчетного анализа следует, что причиной возникновения остаточного момента в рассматриваемом типе МД являются высшие гармонические составляющие МПВВ – третья, шестая и двенадцатая; остаточный момент МД является знакопеременной функцией, изменяющейся от угла поворота ротора с периодичностью, в общем случае, суммы шестой и двенадцатой гармоник на его полюсном (зубцовом) делении, и может быть отнесен к инструментальной погрешности МД. Расчетная амплитуда остаточного момента МД при учете только третьей или только двенадцатой гармоники МПВВ составляет на порядок меньшее значение, чем при учете только шестой гармоники или их суммы для $k_{zP} = 0,5$ и статора $k_{zC} = 0,4$. В то же время, как показал численный анализ, влияние на образование остаточного момента гармоник МПВВ более высокого порядка незначительно.

На рис. 5 представлены результаты численных расчетов относительных значений амплитуд гармоник МПВВ для ряда конструкций МД [8, 9, 16], выполненных по методике [19], с параметрами зубцовой зоны ротора $k_{zP} = 0,5$ и статора k_{zC} от 0,33 до 0,5. На рис. 5 амплитуда третьей гармоники (кривая 1) для наглядности уменьшена в 10 раз.

Полученные амплитуды гармоник МПВВ в функции k_{zC} сопоставимы с полученными в [20]. Величину остаточного момента в рассматриваемых МД при $k_{zC} = 0,4$ (рис. 4), которая находится на уровне 3–3,5%, определяют гармоники с номерами 3, 6, 9 и 12. При этом, согласно выражениям (9), (11) и (19), имеет место взаимодействие указанных гармоник МПВВ, что приводит к возрастанию величины остаточного момента в МД. Если относительные значения амплитуд гармоник МПВВ с номерами 6, 9 и 12, например, в области значения $k_{zC} = 0,45$ (рис. 5) имеют второй порядок малости, то можно предположить, что в этом случае расчетная величина остаточного момента определяется только третьей гармоникой, как

это следует из (18) и рис. 4, и не превышает 0,2%. Указанное иллюстрируется (рис. 6) расчетными функциями изменения остаточного момента МД в зависимости от значений k_{ZC} . Однако, как следует из рис. 4 (кривая 4) и выражения (12), определенный вклад в величину остаточного момента МД вносит двенадцатая гармоника, что иллюстрируется кривой 3 (рис. 6). Следует также отметить, что по результатам расчетов относительных значений амплитуд гармоник МПВВ МД в функции k_{ZC} (рис. 5) принятие за второй порядок малости амплитуд ряда гармоник согласно выражениям (11), (13), (18) и (20) допустимо.

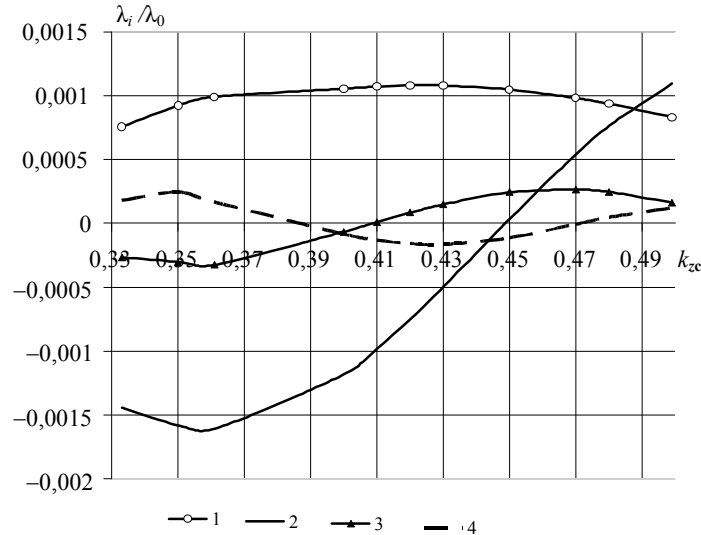


Рис. 5. Относительные значения гармонических составляющих МПВВ МД в функции k_{ZC} : 1 – 3-я гармоника; 2 – 6-я гармоника; 3 – 9-я гармоника; 4 – 12-я гармоника

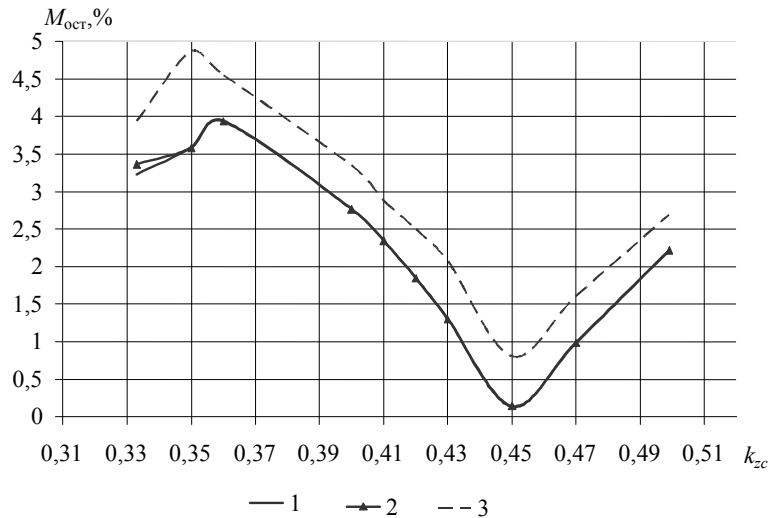


Рис. 6. Изменение остаточного момента МД в функции k_{ZC} при учете различных гармонических составляющих МПВВ: 1 – 3 и 6 гармоник; 2 – 3, 6 и 9 гармоник; 3 – 3, 6 и 12 гармоник

Отклонения от униполярного распределения магнитного потока

Одним из существенных факторов, влияющим на величину остаточного момента МД при его изготовлении, является угловое отклонение γ от заданного разворота зубчатых магнитопроводов ротора друг относительно друга на 180 эл. градусов (рис. 1), что вызывает нарушения в униполярном распределении магнитного потока от ПМ.

Для оценки влияния этого углового отклонения на гармонический состав МПВВ МД и соответственно на величину его остаточного момента, введем γ и $\beta = \alpha + \gamma$ в выражения (2), (4) и (9) следующим образом:

$$\lambda_k'' = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \cos \left[i \cdot \left(z_2 (\alpha + \gamma) - (k-1) \frac{2\pi}{3} + \pi \right) \right]; \quad (21)$$

$$R_{\gamma} \approx \frac{1}{p\lambda_0} \left(\frac{1}{1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha + \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha} \right) + \frac{1}{p\lambda_0} \left(\frac{1}{1 - \mu_3 \cos 3z_2\beta + \mu_6 \cos 6z_2\beta - \mu_9 \cos 9z_2\beta + \mu_{12} \cos 12z_2\beta} \right); \quad (22)$$

$$\frac{dR_{\gamma}}{d\alpha} = \frac{3z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\alpha + 2\mu_6 \sin 6z_2\alpha + 3\mu_9 \sin 9z_2\alpha + 4\mu_{12} \sin 12z_2\alpha}{(1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha + \mu_6 \cos 6z_2\alpha + \mu_9 \cos 9z_2\alpha + \mu_{12} \cos 12z_2\alpha)^2} \right) - \frac{3z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\mu_3 \sin 3z_2\beta - 2\mu_6 \sin 6z_2\beta + 3\mu_9 \sin 9z_2\beta - 4\mu_{12} \sin 12z_2\beta}{(1 - \mu_3 \cos 3z_2\beta + \mu_6 \cos 6z_2\beta - \mu_9 \cos 9z_2\beta + \mu_{12} \cos 12z_2\beta)^2} \right). \quad (23)$$

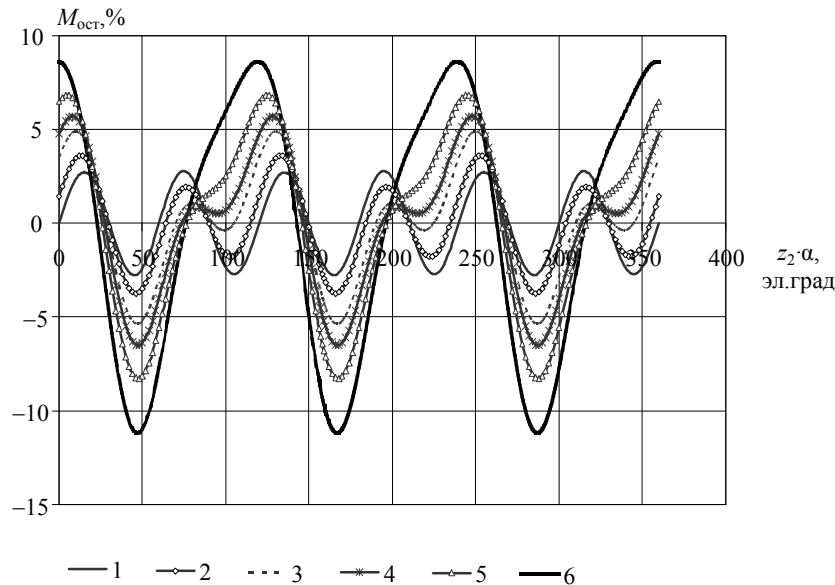


Рис. 7. Зависимости изменения остаточного момента МД при учете всех гармонических составляющих МПВВ от величины углового отклонения γ : 1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – $\gamma = 0,7\%$; 3 – $\gamma = 1,78\%$; 4 – $\gamma = 2,49\%$; 5 – $\gamma = 3,56\%$; 6 – $\gamma = 5,3\%$

На рис. 7 представлены результаты численных расчетов зависимости изменения остаточного момента МД (в процентах к пусковому моменту) с учетом (23) при угловом отклонении γ (в процентах от полюсного деления его ротора) в функции электрического угла поворота ротора $z_2 \cdot \alpha$, как это выполнено и показано на рис. 4 по (10). Следует отметить, что в (22) и (23) учтены гармонические составляющие с номерами 3, 6, 9 и 12 МПВВ. Далее получим выражение для расчета остаточного момента МД при смещении магнитопроводов его ротора на угол γ с учетом только третьей гармоники МПВВ, что дает возможность оценить результирующий характер изменения его остаточного момента. В этом случае с учетом (21) и (22) выражение (23) примет вид

$$\frac{dR_{\gamma}}{d\alpha} = \frac{3\mu_3 z_2}{p\lambda_0} \left(\frac{\sin 3z_2\alpha}{(1 + \mu_3 \cos 3z_2\alpha)^2} - \frac{\sin 3z_2(\alpha + \gamma)}{(1 - \mu_3 \cos 3z_2(\alpha + \gamma))^2} \right). \quad (24)$$

Выполнив преобразования в выражении (24) с учетом того, что угловое отклонение γ не превышает, как правило, 3–5% от полюсного деления ротора МД, а величина $\mu_3^2 \cos^2(3z_2\alpha)$ имеет четвертый порядок малости и поэтому ей можно пренебречь по сравнению с единицей, получим:

$$\frac{dR_{\gamma}}{d\alpha} = -\frac{6\mu_3 z_2}{p\lambda_0} \left(\sin \frac{3z_2\gamma}{2} \cdot \cos \left(3z_2\alpha + \frac{3z_2\gamma}{2} \right) + \mu_3 \sin(6z_2\alpha + 3z_2\gamma) \right). \quad (25)$$

Далее, по (8) и с учетом (25), остаточный момент МД определится как

$$M_{ост-\gamma} = \frac{F_m'^2 \cdot 3\mu_3 z_2}{p\lambda_0 (R_m' + R_3)^2} \left(\sin \frac{3z_2\gamma}{2} \cdot \cos \left(3z_2\alpha + \frac{3z_2\gamma}{2} \right) + \mu_3 \sin(6z_2\alpha + 3z_2\gamma) \right). \quad (26)$$

Из (23), (26) и рис. 7 следует, что остаточный момент МД изменяется в функции угла поворота ротора с периодичностью третьей и шестой гармоник на его полюсном (зубцовом) делении. При этом появление третьей гармоники изменения остаточного момента МД обусловлено наличием углового отклонения γ .

Угловое отклонение γ	Остаточный момент МД, %, по выражениям:		
	(23)	(24)	(26)
$\gamma = 0^\circ$	0,774	0,1652	0,165
$\gamma = 0,7\%$	1,838	1,099	1,1
$\gamma = 1,78\%$	3,458	2,641	2,643
$\gamma = 2,49\%$	4,536	3,668	3,670
$\gamma = 3,56\%$	6,156	5,179	5,183
$\gamma = 5,3\%$	8,735	7,58	7,583

Таблица. Амплитуды остаточного момента МД

В таблице приведены значения амплитуд остаточного момента МД при введении различного по величине углового отклонения γ , рассчитанные по выражениям (23), (24) и (26) с учетом данных рис. 5 при $k_{ZP} = 0,5$ и $k_{ZC} = 0,45$.

Расчетные данные, приведенные в таблице, показывают следующее. Выполненные преобразования и принятые допущения при переходе от выражения (24) к выражению (26) корректны, поскольку вычисленные значения остаточного момента МД по ним практически равны друг другу. Доминирующее влияние на увеличение остаточного момента МД при угловом отклонении γ имеет третья гармоника МПВВ, при этом его высшие гармонические составляющие остаются неизменными. Тем не менее, общий уровень остаточного момента МД при малых значениях углового отклонения определяется высшими гармоническими составляющими МПВВ, как это было показано выше.

Заключение

Основной причиной возникновения остаточного момента в обесточенном индукторном многополюсном электродвигателе униполярного типа является наличие высших гармонических составляющих в магнитной проводимости воздушного зазора, образованного его зубчатыми статором и ротором, которые вызывают возникновение пульсаций момента под воздействием магнитного потока от постоянных магнитов.

Остаточный момент МД является знакопеременной функцией, изменяющейся от угла поворота ротора с периодичностью, в общем случае, доминирующей шестой гармоникой на угловом интервале его полюсного деления, и, с точки зрения работы МД в составе следящего электропривода, его остаточный момент может быть отнесен к инструментальной погрешности моментного электродвигателя этого типа.

Имеют место определенные соотношения геометрических параметров воздушного зазора МД, образованного зубчатыми статором и ротором, при которых влияние высших гармонических составляющих магнитной проводимости на величину остаточного момента существенно уменьшается. Указанные соотношения могут варьироваться в некотором интервале в зависимости от конкретного конструктивного исполнения зубцовой зоны ротора и статора МД.

Существенным фактором, влияющим на величину остаточного момента МД, является угловое отклонение от заданного разворота зубчатых магнитопроводов ротора друг относительно друга, обеспечивающего униполярное распределение магнитного потока в конструкции МД. Указанное отклонение вызывает появление дополнительно третьей гармоники в изменении остаточного момента МД в функции угла поворота ротора на угловом интервале его полюсного деления.

Достоверность указанных выше теоретических результатов подтверждается практическими данными о гармоническом характере и значениях остаточного момента, полученными на производственных образцах ряда МД, выпускаемых в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и применяемых в следящих безредукторных электроприводах приборов различного назначения [8, 9, 16, 18, 21].

Дальнейшие исследования целесообразны в направлении расчетного анализа и моделирования функции магнитной проводимости зубчатого воздушного зазора МД, определения оптимальных соотношений его геометрических и магнитных параметров с точки зрения минимизации переменного остаточного момента в различных конструктивных исполнениях МД, а также в направлении построения базовой расчетной аналитической модели МД как исполнительного устройства управления параметрами движения в высокоточных следящих безредукторных электроприводах.

Литература

1. Пешехонов В.Г., Гутнер И.Е., Зиненко В.М., Савик В.Ф., Янушкевич В.Е. Перископный комплекс «Парус-98» // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 1 (48). – С. 5–15.
2. Синицын В.А., Томасов В.С. Энергоподсистемы следящих электроприводов измерительных телескопов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 12–17.
3. Садовников М.А., Томасов В.С., Толмачев В.А. Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 6. – С. 81–86.

4. Демагин А.В. Электрические машины для непосредственного привода приборных систем. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1991. – 272 с.
5. Бычков М.Г. Обзор современных электроприводов с вентильными двигателями и их применений // Доклады научно-практического семинара «Электропривод с вентильными двигателями». – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 15–34.
6. Балковой А.С., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 328 с.
7. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Трехфазные бесконтактные индукторные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем // Электротехника. – 2005. – № 1. – С. 21–32.
8. Епифанов О.К. Современные электромеханические устройства безредукторных вентильных электроприводов // Доклады научно-практического семинара «Электропривод с вентильными двигателями». – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 71–99.
9. Епифанов О.К. Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем // Электротехника. – 2005. – № 2. – С. 36–48.
10. Епифанов О.К. Бесконтактный моментный электродвигатель. Патент RU 2285322 РФ, кл.: H02K 21/00.2005. // Патентообладатель ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».
11. Афанасьев А.А. Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с постоянными магнитами // Электричество. – 2011. – № 3. – С. 46–51.
12. Лузин М.И. Магнитоэлектрический вентильный двигатель с улучшенными массогабаритными показателями и малым значением момента «залипания» ротора // Электричество. – 2010. – № 6. – С. 45–48.
13. Гутнер И.Е., Никифоров В.О., Чежин М.С., Шапошников А.С. Управление бесконтактным двигателем с большим остаточным моментом // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2001. – № 3 (3). – С. 150–155.
14. Томасов В.С., Ловлин С.Ю., Егоров А.В. Алгоритмы компенсации пульсаций момента прецизионного электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 77–83.
15. Епифанов О.К., Хрущев В.В. Трехфазные индукторные моментные двигатели с минимальными пульсациями момента // Гироподъемники и навигация. – 2007. – № 4 (59). – С. 82–95.
16. Епифанов О.К., Оськин А.Б., Хрущев В.В. Особенности проектирования униполярного индукторного моментного двигателя с осевым магнитным потоком постоянных магнитов // Электротехника. – 2007. – № 1. – С. 43–51.
17. Левин Н.Н., Горбунов В.П., Серебряков А.Д. Синтез электрических машин с взаимно неподвижными сосредоточенными обмотками // Электротехника. – 1972. – № 7. – С. 30–42.
18. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В., Филиппов М.М. Потери магнитного потока возбуждения в униполярных двигателях с поперечным намагничиванием // Электротехника. – 2007. – № 2 – С. 28–36.
19. Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Анализ и расчет магнитной проводимости воздушного зазора в бесконтактных моментных двигателях модульного типа с электромагнитной редукцией частоты вращения // Электрофорум. – 2003. – № 6. – С. 8–14.
20. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1967. – 344 с.
21. Прецизионная электромеханика. Официальный сайт ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elektropribor.spb.ru/>, свободный. Яз. рус./англ. (дата обращения 08.04.2013).

Епифанов Олег Константинович	–	ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, начальник сектора, epifanov_eok@mail.ru, office@eprib.ru
Салова Ирина Александровна	–	ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, Salova_irine@mail.ru, office@eprib.ru
Гречушкин Юрий Валерьевич	–	ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер, office@eprib.ru

УДК 681.51

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ КВАДРОКОПТЕРА ПО ЗАРАНЕЕ
ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

П.А. Гриценко, А.С. Кремлев, Г.М. Шмигельский

Разработан программный продукт, включающий в себя визуализатор и программу управления квадрокоптером, способную решать задачу формирования и отслеживания траектории полета. Приложение предназначено для системы управления квадрокоптером в автоматическом режиме в местах, где невозможно использовать сигнал от спутника (GPS) или сторонних датчиков, но известен подробный план местности или здания, а также при решении задач, где возникает необходимость вмешательства человека. Реализация разработанного алгоритма на квадрокоптере позволяет избежать постоянных обменов сигналами со станцией; как следствие, снижается потребление электроэнергии приемника и повышается время полета. Апробация программного приложения была выполнена на квадрокоптере Ar Drone компании Parrot. В результате работы программы квадрокоптер повторил заданную траекторию с погрешностью не более 5%.

Ключевые слова: квадрокоптер, траекторное управление, БПЛА, полет по траектории.

Введение

Все большую популярность получают беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в виде многовинтовых устройств, а чаще – квадрокоптеров, представляющих из себя платформу с четырьмя роторами, одна пара которых вращается по часовой стрелке, другая – против. По сравнению с БПЛА вертолетного типа с несущим и рулевым винтами квадрокоптеры обладают рядом преимуществ – надежность и простота конструкции, большая стабильность, компактность и маневренность, малая взлетная масса при существенной массе полезной нагрузки. Область применения квадрокоптеров достаточно широка. Например, они могут быть использованы как недорогое и эффективное средство для получения фото- и видеоизображений с воздуха, в том числе при плохих погодных условиях. Так как квадрокоптер – дистанционно управляемый летательный аппарат, он хорошо подходит для наблюдения и контроля объектов, территорий и зон, доступ к которым затруднен (в случае естественных или техногенных катастроф), или в условиях, непригодных для человека, таких как повышенный уровень радиации или сильное загрязнение воздуха [1–3].

Большинство работ, посвященных решению задач мониторинга местности при помощи БПЛА, связано с движением летательного аппарата по известной траектории. В частности, в работе [4] авторами предлагается система управления, реализующая движение квадрокоптера по прямой линии, соединяющей начальную и конечную точки траектории, с заданной скоростью на заданной высоте над поверхностью земли с учетом рельефа местности. В [5] рассмотрен алгоритм передвижения квадрокоптера вдоль любой траектории в пространстве, при котором квадрокоптер способен следовать за движущимся объектом с известными координатами и скоростью.

В настоящей работе предлагается алгоритм полета квадрокоптера по заранее заданной траектории в автономном режиме, реализованный в программном приложении. Актуальность задачи состоит в том, что полет происходит в закрытом помещении с неизвестными объектами [6–8]. В такой постановке задачи, когда автоматическая система не может однозначно идентифицировать препятствие либо происходит сбой в выполнении задания, либо возникает необходимость дополнительного вмешательства человека при формировании и контроле выполнения пролета по заданной траектории БПЛА [9, 10].

Способ задания траектории

Для формирования траектории создана область рисования компьютерной мышью в окне программы, итоговая траектория представляет собой множество точек на декартовой плоскости с координатами (x, y) . Полученные данные имеют числовое представление в форме массива точек. Этот массив разбивается на небольшие части – отрезки кривой, аппроксимирующие первоначальную траекторию (рис. 1).

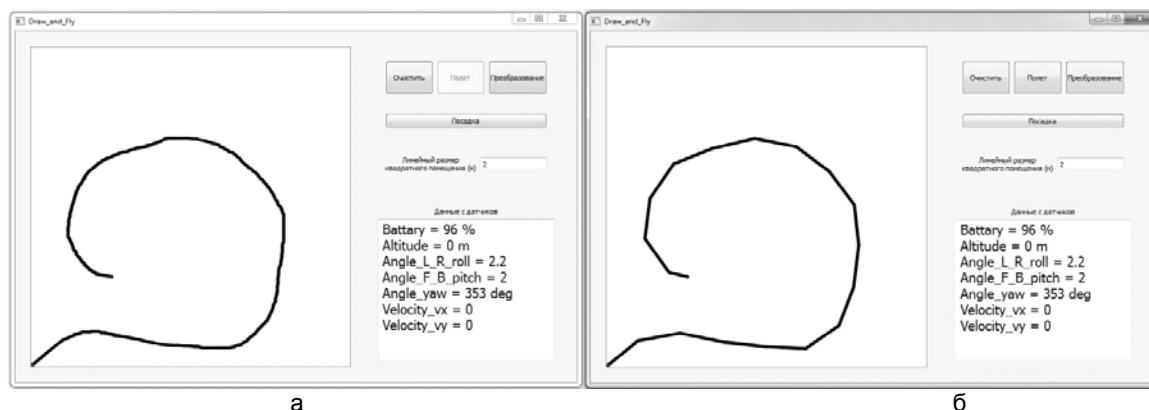


Рис. 1. Окно приложения: траектория, заданная мышью (а); аппроксимированная первоначальная траектория (б)

Аналитический расчет траектории

Перемещение квадрокоптера по траектории складывается из движений следующих типов:

- движение по прямой, соединяющей точки начала и конца элемента-отрезка;
- вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через центр квадрокоптера.

Длина продольного перемещения вычисляется как расстояние между двумя точками (в пикселях), умноженное на коэффициент соответствия. Коэффициент соответствия рассчитывается в зависимости от размеров площадки для полета и области рисования на дисплее.

Расчет угла поворота происходит в несколько этапов (рис. 2).

1. Угол α определяется следующим выражением:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{y_0 - y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}}\right) \cdot \frac{180}{\pi};$$

2. Второй и последующие углы β_i рассчитываются по формуле

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_{i-1}) + (y_i - y_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_i)}{\sqrt{((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2) \cdot ((x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2)}}\right) \cdot \frac{180}{\pi},$$

где $i=1, \dots, N-1$; N – количество отрезков.

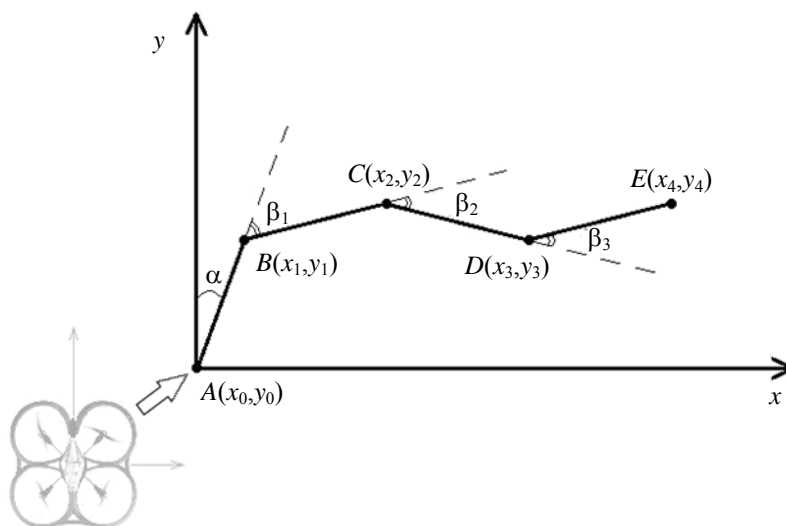


Рис. 2. Расчет угла поворота

Для определения направления поворота квадрокоптера используются несколько условий:

- если $y_i \geq y_{i-1}$ и $\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{(y_i - y_{i-1})} + x_{i-1} \geq x_{i+1}$, то поворот направо, иначе – налево;
- если $y_i \leq y_{i-1}$ и $\frac{(x_i - x_{i-1}) \cdot (y_{i+1} - y_{i-1})}{(y_i - y_{i-1})} + x_{i-1} < x_{i+1}$, то поворот направо, иначе – налево.

Используемый инструментарий (программные средства)

Инструментом для создания оконного приложения был выбран язык программирования C++, реализованный в среде разработки Qt 4.8, что позволило создать исполняемые файлы для различных операционных систем [11]. Вся программа реализована на следующих стандартных классах в Qt:

- QThread – класс, обеспечивающий платформонезависимые потоки;
- QWidget – базовый класс для всех объектов пользовательского интерфейса;
- QUdpSocket – класс, предоставляющий возможность использования UDP (UDP – это протокол пользовательских датаграмм (блоков информации));
- QMouseEvent – класс, содержащий параметры событий мыши;
- QGraphicsView – класс, предоставляющий виджет для отображения содержимого QGraphicsScene;
- QGraphicsScene – класс, предоставляющий поверхность для управления большим числом графических двумерных элементов.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- ручное управление летательным аппаратом при помощи клавиатуры или мыши;
- полет по заданной траектории;
- обмен данными между компьютером и летательным аппаратом по каналу беспроводной связи Wi-Fi;
- возможность отслеживать данные с датчиков летательного аппарата.

Использовано программное обеспечение, распространяемое по свободным лицензиям. Программа может работать под управлением операционных систем Windows XP/Vista/7/8, а также Linux. Рекомендуемые системные требования к компьютеру для запуска и работы программы: 50 МБ свободного места на диске; 512 МБ оперативной памяти; процессор с частотой 1 ГГц.

Выбор исполнительного устройства, апробация программного приложения на реальном объекте

В качестве исполнительного устройства при реализации программы движения по траектории был выбран квадрокоптер Ar Drone (рис. 3). К его преимуществам перед аналогами можно отнести наличие беспроводной связи, простое формирование команд управления, встроенные датчики, такие как гироскоп и акселерометр, штатная автоматическая система стабилизации, взлета и посадки.



Рис. 3. Квадрокоптер Ar Drone

Связь компьютера с квадрокоптером осуществляется посредством Wi-Fi, а управление организовано в виде UDP-датаграмм. Общий вид команд управления Ar Drone задается следующим образом:

$AT*PCMD=\%d,\%d,\%d,\%d,\%d,\%d<LF>$,

где аргумент 1 – порядковый номер команды; аргумент 2 – флаг, разрешающий комбинированные команды; аргументы 3–6 определяют движение влево–вправо, вперед–назад, вверх–вниз и вращение вокруг вертикальной оси соответственно. Все значения находятся в интервале $[-1; 1]$.

При нажатии кнопки «Полет» в главном окне приложения (рис. 1) квадрокоптеру отправляется команда на взлет, после получения которой он автоматически поднимается на заданную высоту. Рассчитанные углы и расстояния между точками формируют управляющее воздействие для Ar Drone, отправляемое в режиме реального времени с использованием данных с датчиков для более точного следования по траектории. Движение осуществляется в горизонтальной плоскости без учета изменения высоты летательного аппарата относительно земли. При достижении конечной точки траектории приложение отправляет квадрокоптеру команду посадки.

В экспериментах квадрокоптер под управлением разработанной программы повторил заданную траекторию с погрешностью не более 5%.

Заключение

Предложен способ управления летательным аппаратом с компьютера по беспроводной связи, который позволяет задавать и отслеживать траекторию полета БПЛА. Сформированная в результате реализации программы траектория предназначена для системы управления квадрокоптером в автоматическом режиме в местах, где невозможно использовать сигнал от спутника (GPS) или сторонних датчиков, но известен подробный план местности или здания. Реализация разработанного алгоритма на квадрокоптере позволяет избежать постоянных обменов сигналами со станцией; как следствие, снижается потребление электроэнергии приемника и повышается время полета, что дает возможность летательному аппарату преодолевать большее расстояние по сравнению с ручным управлением. При проведении экспериментов на квадрокоптере Ar Drone компании Parrot по прохождению заранее заданной траектории в автоматическом режиме летательный аппарат ни разу не потерял связь с наземной станцией, выполняя траекторию с погрешностью не более 5%.

Исследование выполнено при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.0421 и гос. контракт № 16.740.11.0553.

Литература

1. Ситников Д.В., Бурьян Ю.А., Русских Г.С. Автопилот мультикоптера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 7. – С. 213–221.
2. Рубин Д.Т., Конев В.Н., Стариковский А.В., Шептунов А.А., Смирнов А.С., Толстая А.М. Разработка квадрокоптеров со специальными свойствами для проведения разведывательных операций // Спецтехника и связь. – 2012. – № 1. – С. 28–30.
3. Эпов М.И., Злыгостев И.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 2. – № 3. – С. 22–27.
4. Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Нестеров А.А., М.Н. Филиппов. Управление квадрокоптером на основе организации движения по желаемой траектории в пространстве состояний // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – С. 217–222.
5. Puls T., Hein A. 3D trajectory control for quadcopter // Intelligent Robots and System (IROS), IEEE/RSJ International Conference on, 2010. – P. 640–645.
6. Бобцов А.А., Шаветов С.В. Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 33–39.
7. Чеботарев С.Г., Кремлев А.С. Анализ линейных систем с переменными параметрами для синтеза интервальных наблюдателей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 6. – С. 50–53.
8. Бобцов А.А., Пыркин А.А. К задаче управления параметрически не определенным линейным объектом с запаздыванием в канале управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 138.
9. Андреев В.Л., Иванов Р.В., Козлов Е.Б., Потупчик С.Г., Соколов П.В. Системы управления малоразмерными дистанционно пилотируемыми самолетами // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 48–57.
10. Литвинов Ю.В., Бушуев А.Б., Гриценко П.А., Шмигельский Г.М. Полет квадрокоптера по произвольно задаваемой траектории // Материалы IX международной научно-практической конференции «Современные научные достижения–2013». – Технические науки: Прага. Издательский дом «Образование и наука» ООО. – 2013. – Часть 77. – 96 с.
11. Бланшет Ж., Саммерфилд М. QT4 программирование GUI на C++. – 2-е изд. – ООО КУДИЦ-Образ, 2008. – 738 с.

Гриценко Полина Андреевна

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Polina.gritsenko@gmail.com

Кремлев Артем Сергеевич

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kremlev_artem@mail.ru

Шмигельский Григорий Михайлович

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Gribka16@gmail.com

УДК 62.50: 681.50.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМАХ С КРАТНЫМИ КОМПЛЕКСНО-СОПРЯЖЕННЫМИ СОБСТВЕННЫМИ ЧИСЛАМИ ИХ МАТРИЦ СОСТОЯНИЯ

Т.А. Акунов, Н.А. Дударенко, Н.А. Полинова, А.В. Ушаков

Рассматривается устойчивая непрерывная система, матрица состояния которой обладает спектром кратных комплексно-сопряженных собственных чисел, кратность которых равна размерности ее вектора состояния. Особое внимание обращается на ситуацию, когда модуль вещественной части собственного числа меньше единицы. Устанавливается, что в этой ситуации уже при малой колебательности собственных чисел появляется заметный выброс в процессах по норме свободного движения по вектору состояния и величина выброса тем больше, чем меньше по модулю вещественная составляющая собственного числа и тем больше его кратность и мнимая часть.

Ключевые слова: комплексно-сопряженные собственные числа, кратность, свободное движение, норма, выброс.

Введение. Постановка задачи

Ставится задача исследования свободного движения устойчивой линейной непрерывной многомерной динамической системы по норме вектора состояния с целью изучения влияния на это поведение кратности собственных чисел ее матрицы состояния и значения их модуля. В работе поставленная задача

решается для случая комплексно-сопряженных кратных собственных чисел. Более того, предполагается, что кратность собственного числа равна размерности вектора состояния. Как будет показано, приходится констатировать системное явление, состоящее в том, что в устойчивой системе при кратности собственных чисел, большей единицы, и значениях модуля вещественной части собственных чисел, меньших единицы, возникает возможность появления заметных выбросов нормы вектора состояния в свободном движении уже при малой колебательности. Обнаруживается, что величина выброса растет с уменьшением модуля вещественной части собственных чисел, с увеличением их кратности и модуля мнимой. Настоящая работа является продолжением работы [1].

Конструирование канонического «квазиторданова» представления матрицы состояния непрерывной системы с кратными комплексно-сопряженными собственными числами

Рассмотрим линейную гурвицеву непрерывную многомерную динамическую систему, задаваемую [1, 2] в векторно-матричной форме

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t), \mathbf{x}(t)|_{t=0} = \mathbf{x}(0), \tag{1}$$

где $\mathbf{x}(0), \mathbf{x}(t)$ – вектора соответственно начального и текущего состояний системы; \mathbf{F} – ее матрица состояния; $\mathbf{x}(0), \mathbf{x}(t) \in R^n; \mathbf{F} \in R^{n \times n}$. Матрица \mathbf{F} системы (1), заданная в произвольном базисе, такова, что ее алгебраический спектр $\sigma\{\mathbf{F}\}$ собственных чисел удовлетворяет условию

$$\sigma\{\mathbf{F}\} = \{\lambda_{2i-1,2i} = \arg[\det(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{F}) = 0]: \lambda_{2i-1,2i} = \alpha \pm j\beta; i = \overline{1, n/2}\}. \tag{2}$$

Из (2) следует, что матрица \mathbf{F} имеет единственную пару комплексно-сопряженных собственных чисел кратности $\mu = n/2$, где $n = \dim(\mathbf{x})$. Дополним (2) условием, накладываемым на геометрический спектр собственных подпространств в виде значения дефекта характеристической матрицы [2] матрицы \mathbf{F} , записываемым в форме $def(\lambda\mathbf{I} - \mathbf{F}) = 2$. Тогда каноническая форма матрицы, построенная на спектре $\sigma\{\mathbf{F}\}$ собственных чисел матрицы \mathbf{F} , будет представлять собой $(n \times n)$ -«квазиторданову» клетку $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$. При конструировании «квазитордановой» клетки $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$ потребуем выполнения условия

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} \{\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)\} = \mathbf{J}(\alpha). \tag{3}$$

Для конструирования «квазитордановой» клетки $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$ воспользуемся структурным представлением системы

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{J}(\alpha) \tilde{\mathbf{x}}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t)|_{t=0} = \tilde{\mathbf{x}}(0), \tag{4}$$

которое приведено на рис. 1.

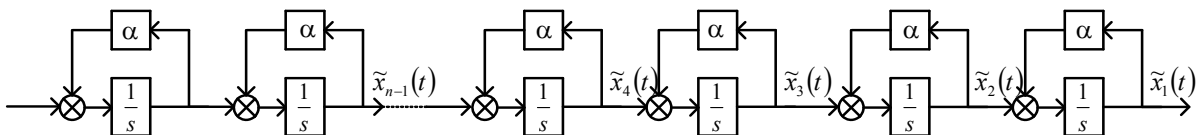


Рис. 1. Структурная реализация системы (4)

Нетрудно видеть, что условиям (2) и (3) будет удовлетворять система

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) \tilde{\mathbf{x}}(t), \tilde{\mathbf{x}}(t)|_{t=0} = \tilde{\mathbf{x}}(0), \tag{5}$$

структурное представление которой получается из структурной схемы рис. 1, в котором пары интеграторов, примыкающих друг к другу, охвачены обратной связью с коэффициентом передачи « $-\beta^2$ » так, что получается схема, приведенная на рис. 2.

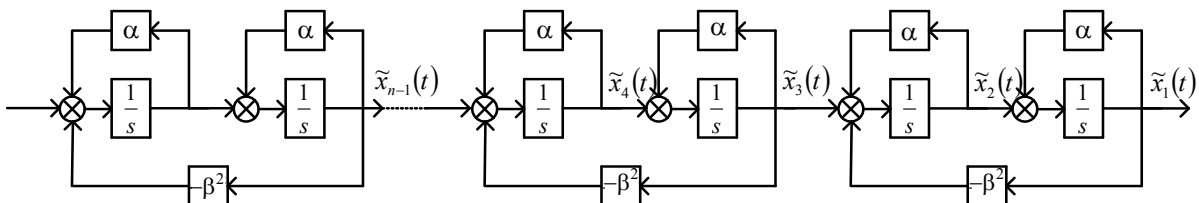


Рис. 2. Структурная реализация системы (5)

Если учесть, что на непосредственном входе i -го интегратора наблюдается переменная $\dot{\tilde{x}}_i(t)$, то со структурной реализации рис. 2 системы (5) может быть «списана» матрица $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$, которая получает представление

$$\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} \alpha & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\beta^2 & \alpha & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta^2 & \alpha & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\beta^2 & \alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что «квазитордановая» матрица $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$ вида (6) допускает аддитивную декомпозицию в виде

$$\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) = \text{diag} \{ \lambda_i = \alpha; i = \overline{1, n} \} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\beta^2 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\beta^2 & 0 \end{bmatrix} = \alpha \mathbf{I} + \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta). \quad (7)$$

Исследование свободного движения непрерывной многомерной системы для случая кратных комплексно-сопряженных собственных чисел ее матрицы состояния

Поставим задачу исследования свободного движения системы (5) по вектору ее состояния в скаляризованной форме. Решение системы (5) $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$ с использованием представления (7) приобретает [1–4] вид

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0)) = \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} \tilde{\mathbf{x}}(0) = e^{\alpha t} \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \tilde{\mathbf{x}}(0). \quad (8)$$

Скаляризацию векторного процесса (8) осуществим на основе использования согласованных [2] векторных и матричных норм, в результате чего получим цепочку соотношений

$$\| \tilde{\mathbf{x}}(t) \| = \| e^{\alpha t} \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \tilde{\mathbf{x}}(0) \| = e^{\alpha t} \| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \tilde{\mathbf{x}}(0) \| \leq e^{\alpha t} \| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \| \cdot \| \tilde{\mathbf{x}}(0) \|. \quad (9)$$

Заметим, что в отличие от случая вещественных кратных собственных значений, рассмотренного в [1], для которого матричная экспонента $\exp \{ \mathbf{J}(0) t \}$ имеет прозрачную алгоритмическую основу для формирования ее представления, матричная экспонента $\exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \}$ таким свойством не обладает. В связи с этим в дальнейшем матричную экспоненту $\exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \}$ вычислим для достаточно репрезентативной системной ситуации, характеризующейся $n = 6$. $\mu = n/2 = 3$. В итоге получим цепочку равенств на основе вычисления обратного преобразования Лапласа от резольвенты

$$\exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} = L^{-1} \{ (s \mathbf{I} - \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta))^{-1} \} = \left. \begin{aligned} & [\cos \beta t, -\beta \sin \beta t, 0, 0, 0, 0]^T, [\beta^{-1} \sin \beta t, \cos \beta t, 0, 0, 0, 0]^T, [(2\beta)^{-1} t \sin \beta t, (2\beta)^{-1} (\sin \beta t + \beta t \cos \beta t), \\ & \cos \beta t, -\beta \sin \beta t, 0, 0]^T, [(2\beta^3)^{-1} (\sin \beta t - \beta t \cos \beta t), (2\beta)^{-1} t \sin \beta t, \beta^{-1} \sin \beta t, \cos \beta t, 0, 0]^T, \\ & [(8\beta^3)^{-1} t (\sin \beta t - \beta t \cos \beta t), (8\beta^3)^{-1} ((1 + (\beta t)^2) \sin \beta t - \beta t \cos \beta t), (2\beta)^{-1} t \sin \beta t, \\ & (2\beta)^{-1} (\sin \beta t + \beta t \cos \beta t), \cos \beta t, -\beta \sin \beta t]^T, [(8\beta^5)^{-1} ((3 - (\beta t)^2) \sin \beta t - 3\beta t \cos \beta t), \\ & (8\beta^3)^{-1} t (\sin \beta t - \beta t \cos \beta t), (2\beta^3)^{-1} (\sin \beta t - \beta t \cos \beta t), (2\beta)^{-1} t \sin \beta t, \beta^{-1} \sin \beta t, \cos \beta t]^T \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что столбцовая норма $\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \|$, определяемая последним столбцом матричной экспоненты $\exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \}$, ее строчная норма $\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \|_{\infty}$, определяемая первой строкой экспоненты, и оценка спектральной нормы $\| \exp \{ \mathbf{J}(0) t \} \|_2$, задаваемая [5] мажорирующим неравенством

$$\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \|_2 \leq \left\{ \| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \| \cdot \| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \|_{\infty} \right\}^{1/2},$$

совпадают и вычисляются как норма вектора

$$v(\alpha, \beta, t) = \left[\frac{(3 - (\beta t)^2) \sin \beta t - 3\beta t \cos \beta t}{8\beta^5}, \frac{t(\sin \beta t - \beta t \cos \beta t)}{8\beta^3}, \frac{\sin \beta t - \beta t \cos \beta t}{2\beta^3}, \frac{t \sin \beta t}{2\beta}, \frac{\sin \beta t}{\beta}, \cos \beta t \right]^T. \quad (11)$$

Следует заметить, что требование (3) к «квазитордановой» форме $\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)$ канонического вещественнозначного представления матрицы состояния с кратными комплексно-сопряженными собственными числами выполняется и для нормы матричной экспоненты в форме нормы вектора (11). Действительно, при $\beta \rightarrow 0$ с использованием «замечательного предела» $\lim_{\beta \rightarrow 0} (\sin \beta / \beta) = 1$ и правила Лопиталья [6] доказываются следующие предельные сходимости:

1. $\lim_{\beta \rightarrow 0} (\cos(\beta t)) = 1;$
2. $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\beta} \sin(\beta t) \right) = t \lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(\beta t)}{\beta t} \right) = t;$
3. $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{2\beta} t \sin(\beta t) \right) = \frac{t^2}{2} \lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(\beta t)}{\beta t} \right) = \frac{t^2}{2};$
4. $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{1}{2\beta^3} (\sin(\beta t) - \beta t \cos(\beta t)) \right) = \frac{1}{2} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{t \cos(\beta t) - t \cos(\beta t) + \beta t^2 \sin(\beta t)}{3\beta^2} = \frac{t^3}{6} \lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(\beta t)}{\beta t} \right) = \frac{t^3}{3!};$
5. $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{t}{8\beta^3} (\sin(\beta t) - \beta t \cos(\beta t)) \right) = \frac{t}{8} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{t \cos(\beta t) - t \cos(\beta t) + \beta t^2 \sin(\beta t)}{3\beta^2} = \frac{t^4}{24} \lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{\sin(\beta t)}{\beta t} \right) = \frac{t^4}{4!};$
6. $\lim_{\beta \rightarrow 0} \left(\frac{t}{8\beta^5} ((3 - \beta^2 t^2) \sin(\beta t) - 3\beta t \cos(\beta t)) \right) = \frac{t^2}{40} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{\beta \sin(\beta t) - \beta^2 t \cos(\beta t)}{\beta^4} =$
 $= \frac{t^2}{160} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{\sin(\beta t) - \beta t \cos(\beta t) + \beta^2 t^2 \sin(\beta t)}{\beta^3} = \frac{t^4}{480} \lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{3 \sin(\beta t) + \beta t \cos(\beta t)}{\beta} = \frac{t^5}{5!}.$

Таким образом, оказываются справедливыми предельные переходы $\lim_{\beta \rightarrow 0} \|\exp(\tilde{\mathbf{J}}(0, \beta)) t\|_p = \|\exp(\mathbf{J}(0)t)\|_p, \lim_{\beta \rightarrow 0} \|\exp(\tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta)) t\|_p = \|\exp(\mathbf{J}(\alpha)t)\|_p.$

В работе [1] показано, что для случая вещественных кратных собственных чисел матрицы $\mathbf{J}(\alpha)$ гурвицевой системы такой, что $\lambda = \alpha = \arg\{\alpha < 0 \vee |\alpha| < 1\}$ кратности μ , в сходящихся траекториях свободного движения по норме вектора состояния обнаруживаются выбросы, величина которых тем больше, чем больше кратность μ и меньше модуль $|\alpha| < 1$. Ниже ставятся и решаются две задачи. Первая задача состоит в оценке влияния значения β мнимой части собственного кратного комплексного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$ при сохранении условия $\alpha = \arg\{\alpha < 0 \vee \alpha < 1\}$ на величину выбросов в траекториях системы (5) по норме вектора $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$. Вторая – в оценке возможности появления выбросов в траекториях системы (5) по норме вектора $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$ при условии $\alpha = \arg\{\alpha < 0 \vee |\alpha| \geq 1\}$ и влияния значения β мнимой части собственного кратного комплексного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$ на величину этих выбросов.

Результаты решения первой задачи в форме $\|\tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))\|_{\|\tilde{\mathbf{x}}(0)\|=1}$, вычисленной в силу соотношения (9), на примере системной ситуации, характеризующейся значениями $n = 6, \mu = n/2 = 3, \lambda = \alpha \pm j\beta : \alpha = -0,2$ и $\beta = \text{var}$, сведены в табл. 1.

Вторую задачу, состоящую в оценке возможности появления выбросов в траекториях системы (5) по норме вектора $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$ при условии $\alpha = \arg\{\alpha < 0 \vee |\alpha| > 1\}$ и влияния значения β мнимой части на величину выбросов, начнем с графической иллюстрации известных [7] рекомендаций по секторному ограничению локализации комплексно-сопряженных собственных чисел матрицы состояния ячейки системы (5), представленной на рис. 2 в виде двух последовательно соединенных интеграторов, охваченной отрицательной обратной связью с коэффициентом « $-\beta^2$ », гарантирующей отсутствие переуправления в переходных процессах. Эта иллюстрация приведена на рис. 3.

		$\lambda = \alpha \pm j\beta; n = 6; \mu = 3$					
α	$\alpha = -0,2$						
β	0,01	0,1	0,25	0,5	1	1,25	1,375
$\max_t \ \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))\ _{\ \tilde{\mathbf{x}}(0)\ =1}$	150	110	42	10,6	3,9	9,2	16,8
$t_M = \arg \max_t \ \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))\ $	20	17	10,5	7	7,5	9,2	9,25
β	1,5	1,75	2	3	3,5	5	10
$\max_t \ \mathbf{x}(t, \mathbf{x}(0))\ _{\ \mathbf{x}(0)\ =1}$	30	86	220	3700	11000	$13 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^6$
$t_M = \arg \max_t \ \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))\ $	9,3	9,35	9,4	9,56	9,6	9,72	9,93

Таблица 1. Значения выбросов $\max_t (\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|) = \|\tilde{\mathbf{x}}(t_M)\|$ кривой $\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|$

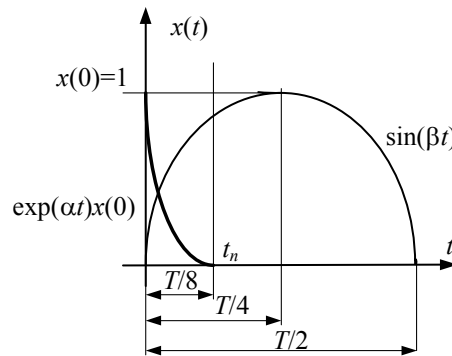


Рис. 3. Графическая иллюстрация свободных движений, порождаемых вещественным α и мнимым β компонентами собственного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$

Свяжем траектории, порождаемые вещественной частью α и мнимой частью β , соотношением $t_n = \gamma T/2 = \gamma \pi/\beta = 3/\alpha$. Тогда при $\beta \leq \gamma(\pi/3)\alpha$ будут отсутствовать перерегулирования, если γ удовлетворяет условию $\gamma < 0,25$, в противном случае перерегулирование, а, следовательно, и выброс в кривой процессов по норме вектора свободного движения будет иметь место. Выделенная i -я ($i = \overline{1, n/2}$) двумерная ячейка задается моделью

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(t) = [\dot{\tilde{x}}_{2i-1}(t), \dot{\tilde{x}}_{2i}(t)]^T = \text{col}\{\alpha, 1, [-\beta^2, \alpha]\} [\tilde{x}_{2i-1}(t), \tilde{x}_{2i}(t)]^T, \tilde{\mathbf{x}}_i(0) = [\tilde{x}_{2i-1}(0), \tilde{x}_{2i}(0)]^T.$$

Движение в ячейке описывается выражением $\tilde{\mathbf{x}}_i(t) = \exp(\alpha t) \text{col}\{[\cos(\beta t), (1/\beta)\sin(\beta t)], [(-\beta)\sin(\beta t), \cos(\beta t)]\} \tilde{\mathbf{x}}_i(0)$, для которого по норме $\|\tilde{\mathbf{x}}_i(t)\|$ при $\|\tilde{\mathbf{x}}_i(0)\| = 1$ оказывается справедливым покрытие $\text{roof}\{\|\tilde{\mathbf{x}}_i(t)\|\} = \exp(\alpha t) \|\text{col}\{[1, (1/\beta)], [(-\beta), 1]\}\|$.

Одновременно при $\beta > |\gamma(\pi/3)\alpha|$ оказывается справедливым непрерывное мажорирующее покрытие процессов, задаваемых нормой вектора (11), использующего, как и выше, замены $\cos(\beta t)$ на 1, $\sin(\beta t)$ на 1, так что это покрытие может быть задано в виде нормы вектора

$$\hat{\mathbf{v}}(\alpha, \beta, t) = \left[\left(\frac{(3 - (\beta t)^2) - 3\beta t}{8\beta^5} \right), \left(\frac{t(1 - \beta t)}{8\beta^3} \right), \left(\frac{1 - \beta t}{2\beta^3} \right), \left(\frac{t}{2\beta} \right), \left(\frac{1}{\beta} \right), 1 \right]^T.$$

Исследование нормы вектора $\hat{\mathbf{v}}(\alpha, \beta, t)$ как функции времени обнаруживает доминирование в ее значении первого члена этого вектора. Это позволяет построить аналитическое представление покрытия (roof) процесса $\|\exp\{\tilde{\mathbf{J}}(0, \beta)t\}\|$ в форме евклидовой нормы вектора

$$\tilde{\mathbf{v}}(\alpha, \beta, t) = \left[\left((3 - (\beta t)^2) - 3\beta t \right) / (8\beta^5), 0, 0, 0, 0, 0 \right], \text{ которое принимает вид}$$

$$roof \left\{ \left\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \} \right\| \right\} = \left\{ \left[\left((3 - (\beta t)^2) - 3\beta t \right) / (8\beta^5) \right]^2 \right\}^{1/2}.$$

Последнее выражение делает справедливым представление покрытия процесса $\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} \|$ в форме

$$roof \left\{ \left\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} \right\| \right\} = e^{\alpha t} \left\{ \left[\left((3 - (\beta t)^2) - 3\beta t \right) / (8\beta^5) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (12)$$

Форма (12) не содержит разрывно дифференцируемых функций типа модульных в случае использования абсолютной векторной нормы, что позволяет применять ее для исследования на экстремумы нормы матричной экспоненты $\exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} = e^{\alpha t} \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(0, \beta) t \}$. Действительно, вычисление

$t_M = \arg \max_t \left\{ \left\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} \right\| \right\}$ из условия $\frac{d}{dt} \left\{ roof \left\{ \left\| \exp \{ \tilde{\mathbf{J}}(\alpha, \beta) t \} \right\| \right\} \right\} = 0$ порождает алгебраическое

уравнение для вычисления t_M :

$$t_M^4 + \frac{6\alpha + 2\beta}{\alpha\beta} t_M^3 + \frac{3\alpha + 9\beta}{\alpha\beta^2} t_M^2 + \frac{3\beta - 18\alpha}{\alpha\beta^3} t_M + \frac{9(\alpha - \beta)}{\alpha\beta^4} = 0. \quad (13)$$

Результаты вычислений t_M с помощью (13) приведены в табл. 2.

	β				
α	2	3	5	10	20
-0,2	9,4	9,56	9,72	9,86	9,93
-2		0,913	0,88	0,9	0,938
-8				0,236	0,22
	t_M				

Таблица 2. Значения моментов t_M выброса в кривой $\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|$

Компьютерное исследование свободного движения непрерывной системы при кратных комплексно-сопряженных числах ее матрицы состояния

Компьютерное исследование процессов по норме $\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|$ как функции собственного кратного комплексно-сопряженного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$ проводилось на примере системы (5), характеризующейся размерностью $n = 6$ и кратностью $\lambda = \alpha \pm j\beta$, равной $\mu = n/2 = 3$, в модельной среде пакета MATLAB с целью визуализации полученных в предыдущем разделе работы результатов. Визуализировались результаты для трех системных ситуаций.

Первая системная ситуация состоит в оценке влияния значения β мнимой части собственного кратного комплексного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$ при сохранении условия $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| < 1 \}$ на величину выбросов в траекториях системы (5) по норме вектора $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$. Результаты визуализации этой ситуации для $\alpha = -0,2$ при $\beta = 0,01$ (рис. 4, а), $\beta = 1$ (рис. 4, б), $\beta = 2$ (рис. 4, в), $\beta = 5$ (рис. 4, г) приведены на рис. 4. Приведенные кривые полностью соответствуют данным табл. 1 и характеризуются резким ростом величины выбросов с ростом значения мнимой части β в области $\beta > 1$.

Вторая системная ситуация состоит в оценке возможности появления выбросов в траекториях системы (5) по норме вектора $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))$ при условии $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| \geq 1 \}$ и влияния значения β мнимой части собственного кратного комплексного числа $\lambda = \alpha \pm j\beta$ на величину и характер этих выбросов. Исследование этой системной ситуации авторы сочли целесообразным начать с рассмотрения тех же проблем для i -й ($i = \overline{1, n/2}$) двумерной ячейки с вектором состояния $\tilde{\mathbf{x}}_i(t) = [\tilde{\mathbf{x}}_{2i-1}(t), \tilde{\mathbf{x}}_{2i}(t)]^T$. Результаты визуализации этой ситуации для $\alpha = -8$ при $\beta = 1$ (рис. 5, а), $\beta = 5$ (рис. 5, б), $\beta = 20$ (рис. 5, в), $\beta = 50$ (рис. 5, г) приведены на рис. 5.

Слабая демпфированность комплексно-сопряженных собственных чисел уже проявляется выбросами в траекториях свободного движения по норме вектора состояния двумерной ячейки. Следует ожидать, что в случае кратных комплексно-сопряженных собственных чисел этот эффект многократно усилится,

несмотря на выполнение условия $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| > 1 \}$. Результаты визуализации этой ситуации для $\alpha = -8$ при $\beta = 1$ (рис. 6, а), $\beta = 3$ (рис. 6, б), $\beta = 20$ (рис. 6, в), $\beta = 50$ (рис. 6, г) приведены на рис. 6.

Приведенные кривые при сходимости их к нулю с течением времени, обнаруживают наличие заметных выбросов, величина которых растет по мере роста значения мнимой части β .

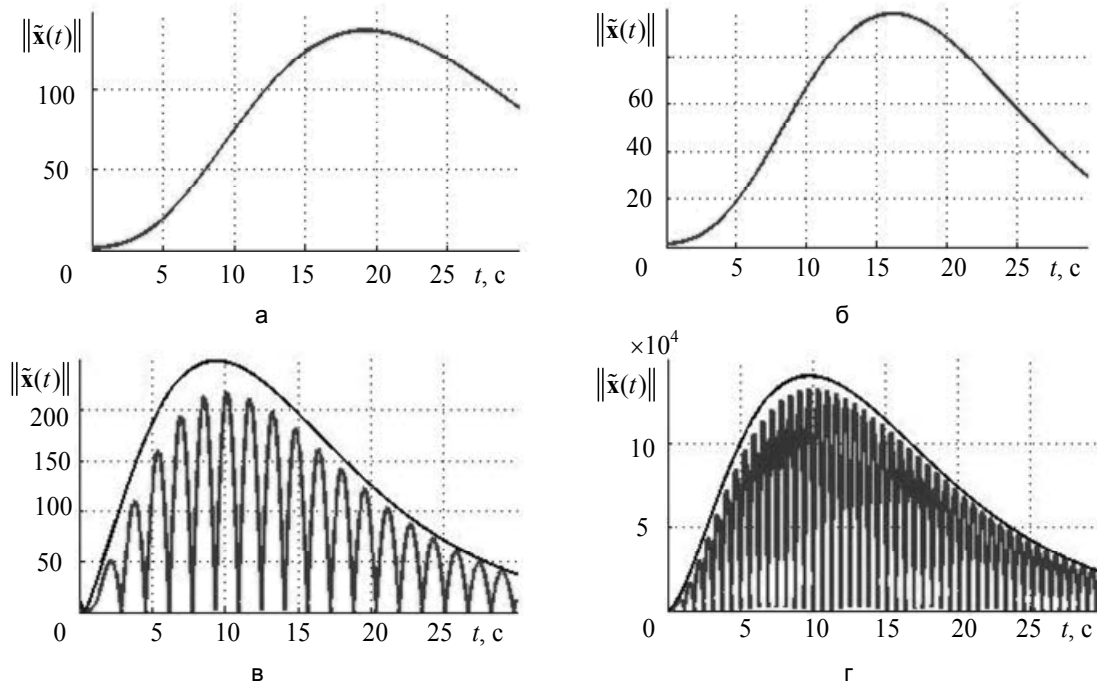


Рис. 4. Кривые $\|\tilde{\mathbf{x}}(t, \tilde{\mathbf{x}}(0))\|_{\|\tilde{\mathbf{x}}(0)\|=1}$ и их покрытия при $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| < 1 \}$ и $\beta = 0,01$ (а); 1 (б); 2 (в); 5 (г)

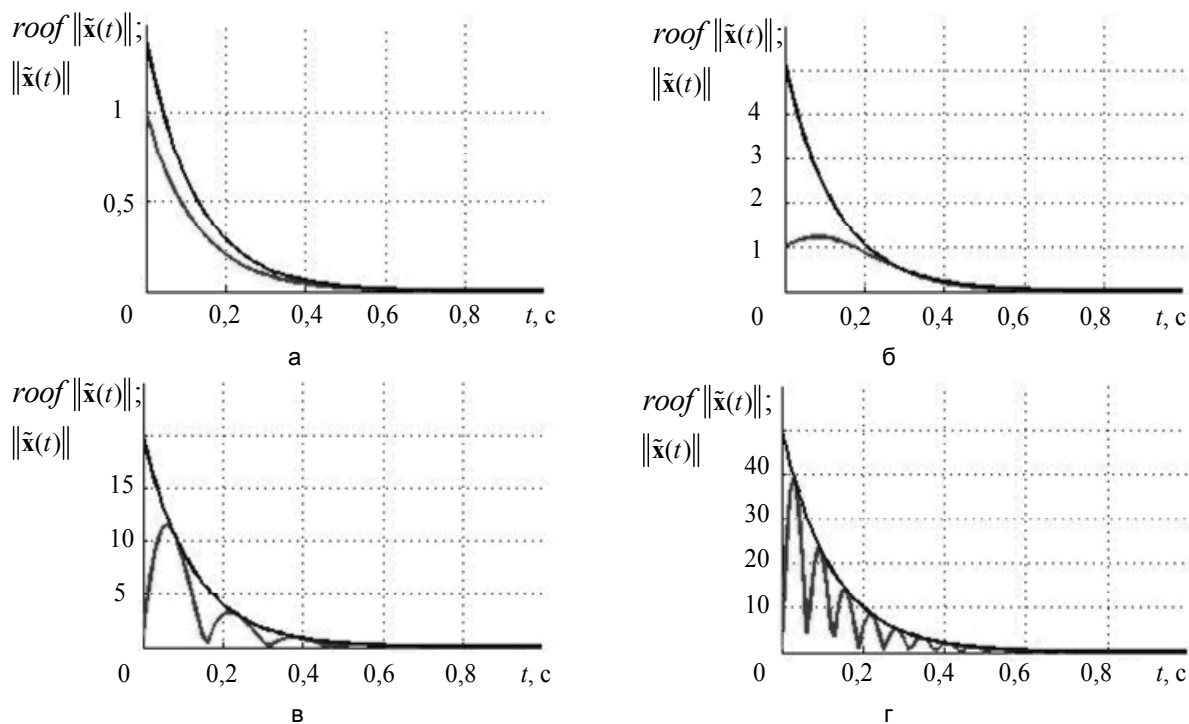


Рис. 5. Кривые $\|\tilde{\mathbf{x}}_i(t, \tilde{\mathbf{x}}_i(0))\|_{\|\tilde{\mathbf{x}}_i(0)\|=1}$ и их покрытия при $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| > 1 \}$, $\beta = 1$ (а); 5 (б); 20 (в); 50 (г)

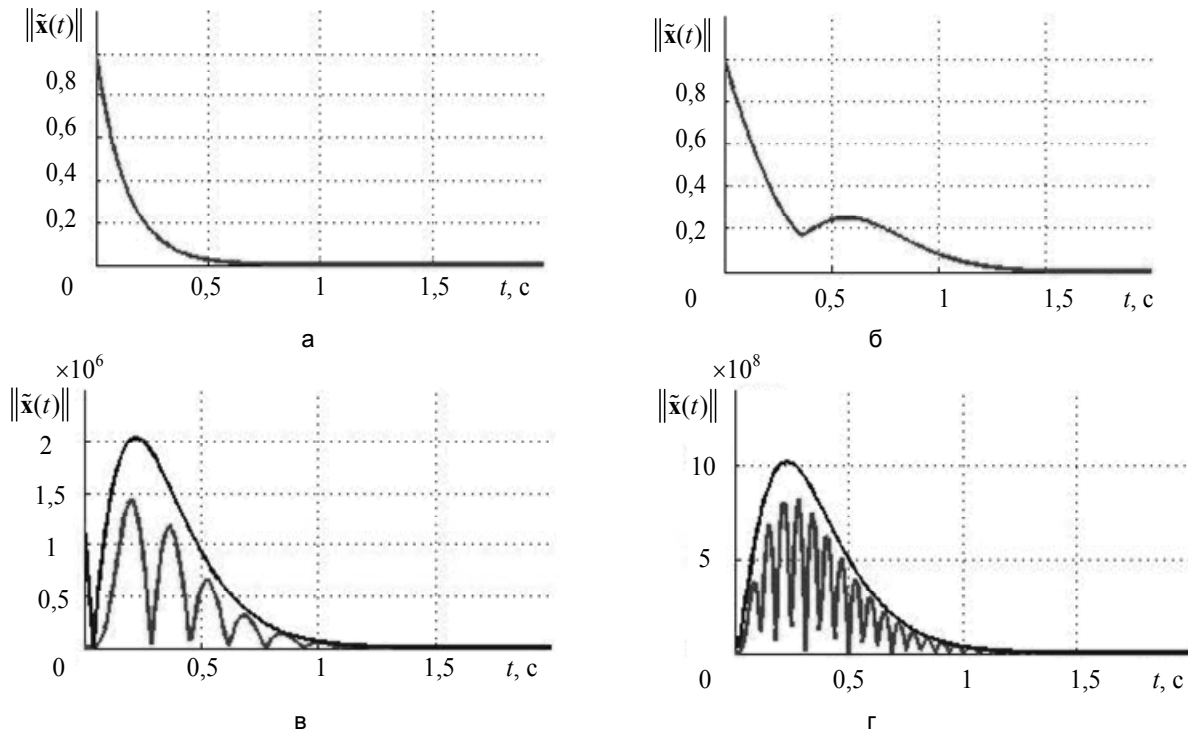


Рис. 6. Кривые $\|\tilde{x}(t, \tilde{x}(0))\|_{\|\tilde{x}(0)\|=1}$ и их покрытия при $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| > 1 \}$ и $\beta = 1$ (а); 3 (б); 20 (в); 50 (г)

Заключение

Кратность собственных комплексно-сопряженных чисел $\lambda = \alpha \pm j\beta$ матриц состояния устойчивых непрерывных систем, как и в случае апериодических систем при вещественной части, удовлетворяющей условию $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| < 1 \}$, наделяет динамические процессы заметными выбросами траекторий свободного движения при их сходимости к нулю с течением времени. Обнаруживается при этом, что слабая демпфированность мод системы, порождаемая ростом значения мнимой части β , является дополнительным фактором увеличения выбросов траекторий свободного движения даже при выполнении условия $\alpha = \arg \{ \alpha < 0 \vee |\alpha| \geq 1 \}$. С тем, чтобы не допустить обнаруженного эффекта кратности собственных чисел при синтезе методами модального управления [4], матрицу состояния системы следует наделять спектром собственных чисел, удовлетворяющим сильному секторному ограничению.

Работа подготовлена при поддержке проекта 14.В37.21.0875 «Разработка систем интервального наблюдения для нестационарных систем с переменными параметрами применительно к мехатронным и робототехническим комплексам».

Литература

1. Акунов Т.А., Дударенко Н.А., Полинова Н.А., Ушаков А.В. Исследование колебательности процессов в апериодических непрерывных системах, порождаемой фактором кратности собственных чисел // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 3 (85). – С. 55–61.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1973. – 575 с.
3. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
4. Дударенко Н.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Математические основы современной теории управления: аппарат метода пространства состояний: Учебное пособие / Под ред. А.В. Ушакова – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 323 с.
5. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
6. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. – 847 с.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – СПб: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.

- Акунов Таалайбек Абакирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, докторант, takunov@mail.ru
- Дударенко Наталия Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, dudarenko@yandex.ru
- Полинова Нина Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, polinova_nina@mail.ru
- Ушаков Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ushakov-avg@yandex.ru

УДК 004.4

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ В ПОВТОРЯЮЩЕЙСЯ
ДИЛЕММЕ ЗАКЛЮЧЕННОГО ПРОТИВ ФИКСИРОВАННОГО МНОЖЕСТВА
ПРОТИВНИКОВ

М.Я. Пинский, Д.В. Степанов

Представлена стратегия для повторяющейся дилеммы заключенного, которая набирает максимальное количество очков против фиксированного набора противников (нескольких классических стратегий, ZD-стратегии) и против нее самой, обеспечивая эволюционную устойчивость в заданном множестве. Приведен конечный автомат, соответствующий данной стратегии, и описано его построение при помощи генетического алгоритма.

Ключевые слова: повторяющаяся дилемма заключенного, конечные автоматы, генетические алгоритмы, ZD-стратегия.

Введение

Дилемма заключенного (ДЗ) – бескоалиционная биматричная игра в теории игр, в которой два игрока X и Y , независимо друг от друга и не имея информации о решении друг друга, осуществляют выбор между двумя стратегиями, традиционно называемыми предательством и кооперацией [1]. Выигрыш каждого участника зависит как от его собственных действий, так и от действий противника, при этом собственно «дилемма» состоит в следующем: очки назначаются так, что взаимная кооперация выгоднее обоюдного предательства, но для каждого отдельного игрока рациональным выбором оказывается предательство.

Повторяющаяся дилемма заключенного (ПДЗ) – расширение ДЗ [2, 3], в котором игра происходит многократно. Если число раундов конечно и известно заранее, то рациональным выбором игрока снова будет постоянное предательство. Все, однако, меняется, как только число раундов становится случайным – множество рациональных стратегий существенно расширяется.

До 2012 г. лучшей стратегией считалась «око за око с прощением» [2, 4], найденная в рамках чемпионата по ПДЗ, организованного Р. Аксельродом и проводившегося начиная с 1980-х г.г. [2]. Данная стратегия состоит в повторении действия оппонента на предыдущем шаге, при этом предательство с небольшой вероятностью прощается, и игрок кооперируется.

Весной 2012 г. В. Прессом и Ф. Дайсоном был предложен принципиально иной класс стратегий, основанных на интерпретации игры с помощью марковских цепей и названных ZD-стратегиями (zero-determinant strategies) [5]. ZD-стратегии задаются четверкой вероятностей выбора кооперации игроком при условии каждого из четырех возможных исходов предшествующего раунда игры. Предложенный класс стратегий вносит существенные изменения в суть игры: игрок X , который использует ZD-стратегию, односторонним образом связывает свой выигрыш с выигрышем оппонента Y , определяя линейную зависимость между очками, которые получит он и его противник. При этом игроком X может быть навязан «несправедливый» раздел очков.

Недостатком ZD-стратегий является то, что они не являются эволюционно устойчивыми, т.е. проигрывают сами себе, что приводит к вытеснению их из популяции, представленной различными стратегиями [6]. Единственный вариант, при котором ZD-стратегия может закрепиться в популяции – это наличие у стратегии «теории ума», т.е. способности распознавать в противнике игрока, придерживающегося ZD-стратегии, для последующей кооперации с ним.

Некоторые классические стратегии эволюционно устойчивы, но против ZD-стратегии они не набирают максимального числа очков. ZD-стратегии имеют возможность получать всегда не меньше очков, чем противник, но при этом против классических стратегий они не набирают большого числа очков. Цель работы – построить стратегию, которая будет набирать максимум очков против всех противников из фиксированного набора классических стратегий и ZD-стратегии.

Дилемма заключенного

ДЗ может быть описана как ситуация, в которой двоим изолированным друг от друга индивидуумам X и Y предлагается на выбор либо дать показания против подельника (предательство – defection), либо хранить молчание (кооперация – cooperation). Действия предпринимаются каждый ход одновременно, после чего игроки узнают результаты предыдущего хода. Обозначим возможные действия игроков буквами d и c (от слов «defection» и «cooperation»). Выигрыши S_X игрока X , в зависимости от выбора собственной стратегии и действий Y , приведены в табл. 1 [1].

	<i>Y</i>	
<i>X</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
<i>c</i>	<i>R</i>	<i>S</i>
<i>d</i>	<i>T</i>	<i>P</i>

Таблица 1. Матрица выигрышей S_X игрока X в ДЗ

Выигрыши игроков следует трактовать в терминах функции полезности [1]. Дилемма возникает в том случае, когда выполнены неравенства $T > R > P > S$ и $2R > T + S$. Последнее неравенство говорит о том, что в случае взаимной кооперации игроков (cc) достигается строгий Парето-оптимум – ситуация, любая альтернатива которой приводит к снижению выигрыша хотя бы для одного игрока. Если бы между игроками была возможна коммуникация, Парето-оптимум описывал бы выбор рациональных игроков, получающих суммарный выигрыш $2R$. Однако, поскольку игра является бескоалиционной и выполнено первое из приведенных выше неравенств, рациональным выбором каждого игрока является предательство – dd , т.е. возникает ситуация равновесия по Нэшу, в которой ни один из игроков не может односторонним образом увеличить свой выигрыш, выбрав альтернативную стратегию. Суммарный выигрыш, отвечающий равновесию по Нэшу $2P < 2R$, что и трактуется как дилемма в рассматриваемой задаче.

Для того чтобы сделать ДЗ более адекватной моделью возникновения кооперации между эгоистичными игроками, было предложено рассматривать ДЗ в форме повторяющейся игры – ПДЗ. Если, однако, число раундов известно игрокам заранее, то по индукции можно получить, что рациональным выбором игрока будет снова стратегия, состоящая в постоянном предательстве. Ситуация меняется, как только число раундов игры становится случайным (заранее неизвестным для игроков).

Проводившийся в начале 1980-х г.г. Р. Аксельродом чемпионат по ПДЗ выявил фаворита – стратегию «око за око», предложенную А. Рапапортом и состоящую в повторении предыдущего хода противника. Данная стратегия относится к классу марковских стратегий – стратегий, очередной ход которых зависит только от результатов предыдущего раунда. Такие стратегии естественно задавать четверкой вероятностей $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_{cc}, p_{cd}, p_{dc}, p_{dd})$ кооперации в текущем раунде при условии известного исхода предыдущего раунда $\{cc, cd, dc, dd\}$. Начальный ход обычно определяется равновероятным выбором кооперации и предательства. В данных обозначениях стратегия «око за око» запишется в виде $\mathbf{p} = (1, 0, 1, 0)$. Обратим внимание на то, что данная стратегия имеет «слабое место» – она никогда не кооперируется, если ее предадут, и, если противник не окажется склонным к прощению, игра закончится постоянным взаимным предательством. Для того чтобы выйти из тупиковой ситуации, была предложена стратегия «око за око с прощением», показавшая себя наиболее успешной в последующих чемпионатах по ПДЗ.

Приведенный пример со стратегией «око за око» показывает, что стратегия, набирающая много очков против других стратегий, может плохо играть сама против себя. Действительно, если две стратегии «око за око» играют друг против друга, то при равновероятном выборе первого хода игры, они с вероятностью $3/4$ в следующем раунде перейдут к постоянному взаимному предательству и наберут мало очков. Таким образом, стратегия «око за око» вытеснит сама себя, даже если она будет преобладать в некотором наборе играющих друг с другом стратегий. Свойство преобладающей стратегии не быть вытесненной никакой другой стратегией называется эволюционной устойчивостью и было предложено Дж.М. Смитом и Дж. Прайсом [6].

ZD-стратегии

В статье В. Пресса и Ф. Дайсона [5] описывается новый класс марковских стратегий для ПДЗ, которые названы авторами ZD-стратегиями. Вероятности $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ для этих стратегий подчиняются следующим равенствам:

$$p_1 = 1 - \phi \cdot (\chi - 1) \cdot \frac{R - P}{P - S},$$

$$p_2 = 1 - \phi \cdot \left(1 + \chi \frac{T - P}{P - S} \right),$$

$$p_3 = \phi \cdot \left(\chi + \frac{T - P}{P - S} \right),$$

$$p_4 = 0,$$

где χ – любое положительное вещественное число, а ϕ удовлетворяет неравенству

$$0 < \phi < \frac{P - S}{P - S + \chi \cdot (T - P)}.$$

Основное свойство так определенных стратегий состоит в том, что если X придерживается ZD-стратегии, то выигрыши игроков S_X и S_Y , за вычетом P , будут пропорциональны с коэффициентом χ (независимо от действий игрока Y):

$$S_X - P = \chi \cdot (S_Y - P).$$

Коэффициент χ определяет «справедливость» раздела выигрыша между игроками. В частности, упоминавшаяся выше стратегия «око за око» также относится к классу ZD-стратегий со «справедливым» коэффициентом $\chi = 1$.

ZD-стратегия успешно играет с игроками, стремящимися максимизировать свой выигрыш, т.е. эволюционными игроками. При любых попытках увеличить число набранных очков эволюционный игрок увеличивает и выигрыш ZD-игрока, гарантируя ему победу в любом случае. При этом, как уже было отмечено относительно стратегии «око за око», ZD-стратегии не являются эволюционно-устойчивыми [6].

Построение оптимальной стратегии

Назовем «оптимальной» эволюционно устойчивую стратегию, набирающую максимум очков в игре против некоторого фиксированного набора стратегий. Умение стратегии играть против себя необходимо для эволюционной устойчивости. Обратим внимание на то, что эволюционная устойчивость понималась в нестрогом смысле: искомая стратегия не должна быть вытесненной никакой другой из заданного множества стратегий. Целью авторов было построить оптимальную детерминированную стратегию.

Был определен следующий набор противников:

- всегда кооперирующийся игрок;
- всегда предающий;
- действующий случайно;
- повторяющий действия противника (стратегия «око за око»);
- ZD-стратегия с $\chi \neq 1$;
- сама искомая стратегия.

Для описания стратегии, адаптирующейся под различные действия противника, был выбран автомат Мура [7], формирующий выходное воздействие в зависимости от текущего состояния. Входным воздействием было действие противника (предательство или кооперация) в предыдущем раунде игры, а выходным – действие игрока X в текущем раунде.

Для поиска автомата, описывающего искомую стратегию, использовался генетический алгоритм [8]. Поскольку в рассматриваемом случае имеется всего два возможных входящих воздействия, каждая особь кодировалась с помощью трех массивов, определяющих целевое состояние X при условии кооперации Y , целевое состояние X при условии предательства Y и действие в новом состоянии. Функция приспособленности была определена как сумма средних выигрышей в попарных играх со всеми противниками, включая себя. Популяция содержала 100 особей, для вычисления функции приспособленности проводилось 130 раундов ПДЗ по 1000 ходов в каждой, что обеспечило попадание значения функции приспособленности в 95%-й доверительный интервал ее ожидаемого значения.

В результате менее чем за час был построен автомат из 17 состояний, представленный на рисунке. В вершинах указано как будет ходить игрок в данном состоянии (c – кооперация, d – предательство), на переходах указано действие противника. Авторы обращают внимание на то, что в работе не ставилась задача поиска автомата с минимальным числом состояний.

Как видно из сводки результатов, приведенной в табл. 2, найденная стратегия набирает наибольшее число очков в игре против остальных игроков из фиксированного множества стратегий. Обратим внимание на то, что при игре против ZD-стратегии (включая и стратегию «око за око») полученная стратегия набирает столько же очков, как и всегда кооперирующийся игрок, т.е. построенная стратегия действительно распознает ZD-стратегию и кооперируется с ней.

Интересно отметить, что в построенном автомате можно выделить состояния, «отвечающие» за работу с ZD-стратегией (это состояния 3, 13, 9). Данное обстоятельство может быть использовано для построения решающего правила для определения, использует противник ZD-стратегию или нет.

Поскольку построенная стратегия набирает максимум очков при игре против всех заданных противников и оптимально играет против самой себя (получая 3 очка), она оказывается эволюционно-устойчивой в оговоренном выше нестрогом смысле.

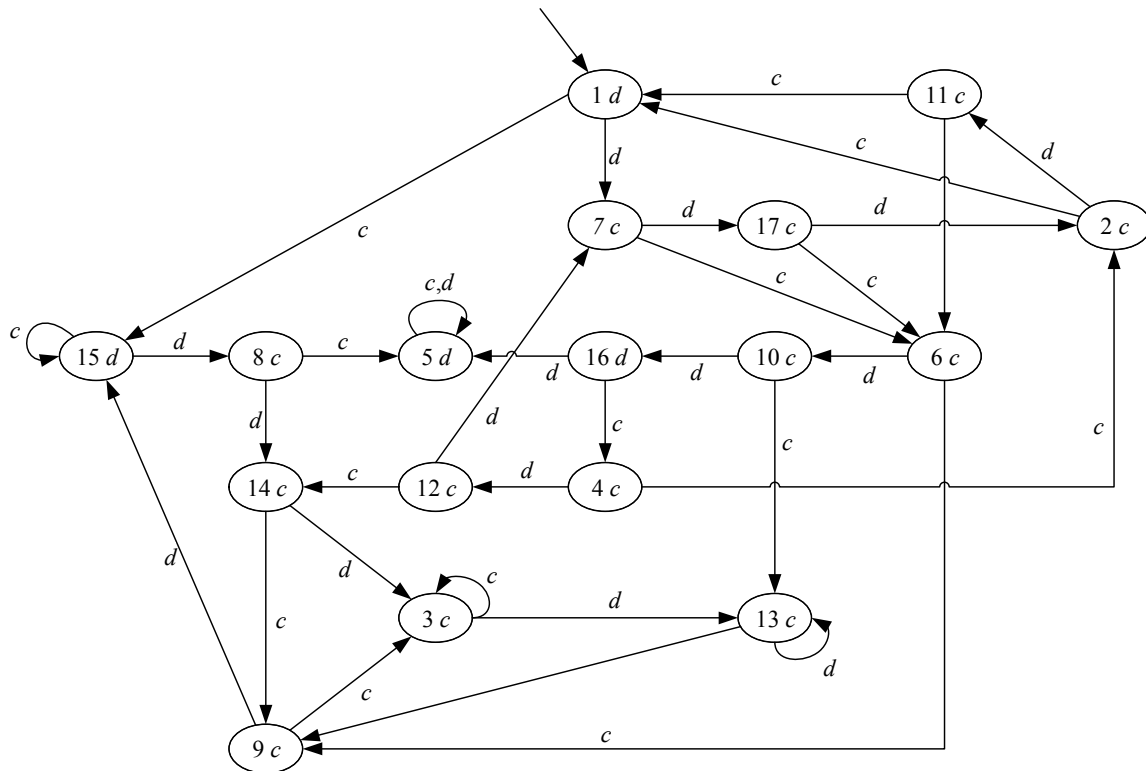


Рисунок. Полученный автомат. В вершинах указано как будет действовать стратегия в данном состоянии. Переходы соответствуют действиям противника

X	Y					
	Всегда кооперирующийся	Всегда предающий	Действующий случайно	Око за око	ZD-стратегия	Полученная стратегия
Всегда кооперирующийся	3	5	4	3	3,7	5
Всегда предающий	0	1	0,5	1	1	1
Действующий случайно	1,5	3	2,25	2,25	2,6	3
Око за око	3	1	2,25	3	1	3
ZD-стратегия	1,9	1	1,5	1	1	1,9
Полученная стратегия	0	1	0,5	3	3,7	3
Сумма	9,4	12	11	13,25	13	16,9

Таблица 2. Сравнительная таблица очков разных стратегий

Заключение

До недавнего времени исследование повторяющейся дилеммы заключенного продвигалось по пути поиска эволюционных стратегий, максимизирующих свой выигрыш. Успешными оказывались стратегии, которые в той или иной степени заставляли противника кооперироваться. Появление нового класса марковских стратегий – ZD-стратегий – сместило акценты, поскольку ZD-стратегии в одностороннем порядке задают линейную зависимость, в которой будут разделены выигрыши соперников. Слабым местом ZD-стратегий является их эволюционная неустойчивость – следствие плохой игры против самой себя.

В работе получена стратегия, которая успешно играет как против классических стратегий, так и против ZD-стратегии, набирая максимально возможное количество очков против каждой из них. Так как автомат, реализующий построенную стратегию, и при игре против самого себя набирает максимум очков, то он является эволюционно устойчивым в описанном множестве противников.

Литература

1. Akin E. Stable Cooperative Solutions for the Iterated Prisoner's Dilemma [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/1211.0969/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.04.2013).
2. Axelrod R., Hamilton W.D. The evolution of cooperation // Science 211. – 1981. – P. 1390–1396.
3. Kendall G., Yao X., Chong S.Y. The Iterated Prisoners' Dilemma 20 Years On. – World Scientific, Singapore. – 2007. – 350 p.
4. Shaun Hargreaves Heap, Varoufakis Y. Game theory: a critical text. – Routledge. – ISBN 0415250943. – 2004. – 384 p.
5. Press W.H., Dyson F.J. Iterated Prisoner's Dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent [Электронный ресурс]. – Режим доступа: arxiv.org/pdf/1208.2666/, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.04.2013).
6. Adami C., Hintze A. Winning isn't everything: Evolutionary instability of Zero Determinant strategies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pnas.org/content/109/26/10134.full.pdf/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 23.04.2013).
7. Шальто А.А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. – СПб: Наука, 1998. – 628 с.
8. Трофимов Д.А., Шальто А.А. Метод оптимизации стратегий в играх для двух участников с использованием генетических алгоритмов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 45–48.

Пинский Михаил Яковлевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mikhailpinsky@gmail.com

Степанов Денис Вячеславович – Концерн «НПО «Аврора», кандидат технических наук, доцент, denis_v_stepanov@hotmail.com

УДК 621.391

ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ С БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ ПО ДЛИНЕ ОЧЕРЕДИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Т.В. Вавенко, В.Л. Стерин, А.В. Симоненко

Предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди для программно-конфигурируемых сетей. Показаны результаты анализа предложенной модели для фрагмента телекоммуникационной сети корпорации Google. Проведено сравнение решения задачи маршрутизации в рамках предложенной модели и модели маршрутизации с балансировкой нагрузки на основе коэффициента максимального использования каналов.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, многопутевая маршрутизация, балансировка нагрузки, многопутевая задержка, коэффициент максимального использования каналов связи, длина очереди, трафик.

Введение

На сегодняшний день многие ученые в области телекоммуникаций говорят о недостатках традиционных TCP/IP-сетей, которые сводятся к главному – невозможности гибко управлять телекоммуникационной сетью (ТКС), что приводит к ухудшению показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [1]. Большая часть этих недостатков минимизируется при реализации идей, заложенных в концепцию программно-конфигурируемых сетей (Software Defined Networking, SDN) [2], которая сегодня активно развивается и, по мнению своих разработчиков, должна эффективно дополнить и модернизировать многие существующие сетевые технологии. Главная идея SDN состоит в отделении управляющего уровня (control plane) от уровня передачи данных (forwarding data plane), что предполагает передачу ряда основных управляющих функций от операционных системы (ОС) узлов (маршрутизаторов и коммутаторов) ТКС к сетевой ОС. При этом сетевая ОС с помощью определенных протоколов, основываясь на работе специальных облачных серверов, решает задачи управления трафиком, в том числе задачи маршрутизации [3], что повышает уровень централизации управления в сети. В связи с этим развитие и внедрение SDN-решений требует усовершенствования протоколов маршрутизации, а также их адаптацию под новые условия.

С другой стороны, стоит отметить, что с целью удовлетворения растущих требований по QoS [1] маршрутные протоколы, кроме классических функций (расчет маршрутов передачи трафика через сеть), поддерживают дополнительные возможности, среди которых – балансировка нагрузки каналов ТКС с реализацией многопутевой стратегии маршрутизации. Обеспечение балансировки нагрузки на практике позволяет оптимизировать решение задачи маршрутизации и эффективно использовать ресурсы сети, в

результате чего улучшаются значения показателей QoS. Эффективность балансировки нагрузки и достигаемое при этом качество обслуживания во многом зависит от адекватности математических моделей и методов, используемых при разработке соответствующих протоколов [3, 4]. Анализ известных протоколов маршрутизации в ТКС показал, что они основаны преимущественно на графовых моделях, в рамках которых задача поиска кратчайшего пути решается при помощи алгоритмов Дейкстры, Беллмана–Форда и др. [3–5]. Однако, учитывая потоковый характер трафика, циркулирующего в современных сетях, перспективным является переход от графовых к потоковым моделям, которые, наряду с расчетом множества путей, определяют порядок распределения по ним трафика пользователей. В результате проведенного анализа [4, 5] замечено, что к настоящему моменту времени известны потоковые модели многопутевой маршрутизации, основанные на сетях массового обслуживания, алгебраических, интегрально-дифференциальных и разностных уравнениях состояния ТКС, тензорном представлении и др.

Важно отметить, что решение задачи маршрутизации в рамках потоковых моделей может осуществляться по разным критериям, которые, как правило, через маршрутную метрику связаны тем или иным образом с коэффициентом использования каналов связи (КС) сети, пропускными способностями КС или показателями QoS. Наибольшее распространение получила модель с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией коэффициента максимального использования каналов ТКС, соответствующему технологии Traffic Engineering [5]. Достоинством этой модели является то, что этот коэффициент использования с ростом загруженности сети растет линейно, что гарантирует отсутствие колебаний в численных значениях основных показателей QoS. Однако исследование данной модели для программно-конфигурированных сетей показало, что балансировка нагрузки по критерию обеспечения минимума коэффициента максимального использования КС не во всех случаях позволяет максимально улучшить уровень QoS [6]. В связи с этим при решении задачи маршрутизации в SDN рекомендуется изменить критерий, положенный в основу оптимизации процесса балансировки нагрузки, таким образом, чтобы максимально улучшить значения основных показателей QoS. Таким образом, актуальной с научной и практической точки зрения представляется задача, связанная с выбором критериев оптимальности процесса балансировки нагрузки в сетях SDN на основе реализации многопутевой стратегии маршрутизации.

Потоковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди на маршрутизаторах телекоммуникационных сетей

При выборе критерия оптимальности процесса балансировки нагрузки в ТКС стоит учесть, что рост интенсивности случайного по своей природе сетевого трафика вызывает образование очередей пакетов на маршрутизаторах. Как известно, именно образование и перегрузка очередей являются основными источниками роста задержек и потерь пакетов. В связи с этим в данной работе предлагается модель многопутевой маршрутизации, в которой критерием балансировки нагрузки выступает минимум функции, связанной с длинами очередей на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

В рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди структура ТКС описывается с помощью графа $G = (V, E)$, где V – множество маршрутизаторов сети, E – множество каналов сети. Для каждой дуги $(i, j) \in E$ характерна ее пропускная способность $c_{i,j}$. Каждому трафику из множества K сопоставлен ряд параметров: d_k, s_k, t_k – интенсивность k -го трафика, маршрутизатор-источник и маршрутизатор-получатель соответственно. Управляющей переменной служит величина $x_{i,j}^k$, которая характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$. В соответствии с физикой решаемой задачи на переменные $x_{i,j}^k$ накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$

Для учета возможных потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом в модели предусмотрено условие сохранения потока [7]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(j,i)}^k) = 0, & k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k = 1, & k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(i,j)}^k) = \varepsilon^k, & k \in K, i = t_k. \end{cases} \quad (2)$$

где ε^k – доля пакетов k -го трафика, обслуженного сетью, т.е. пакеты которого доставлены от узла-отправителя до узла-получателя; $p_{(i,j)}^k$ – вероятность потерь пакетов k -го трафика на j -м интерфейсе i -го маршрутизатора по причине его перегрузки.

Чтобы предотвратить перегрузку в каналах сети, необходимо обеспечить выполнение условий [8]

$$\sum_{k \in K} d_k x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E. \quad (3)$$

В качестве критериев оптимальности предлагается использовать одно из условий –

$$\min_x \left(\sum_{(i,j) \in E} (a_{i,j} n_{i,j}) \right), \quad (4)$$

связанное с минимизацией взвешенной суммы длин очередей на интерфейсах маршрутизаторов в ТКС, или

$$\min_x (\max_{(i,j) \in E} a_{i,j} n_{i,j}), \quad (5)$$

обеспечивающее минимизацию максимальной по всем интерфейсам длины очереди, где $n_{i,j}$ – длина очереди в i -м маршрутизаторе на исходящем интерфейсе к j -му маршрутизатору ($i, j \in V, i \neq j$), $a_{i,j}$ – весовой коэффициент очереди, который зависит от важности того или иного канала связи $(i, j) \in E$ и его места в структуре ТКС.

В рамках предлагаемой потоковой модели (1)–(5) задача поиска множества оптимальных путей сведена к задаче нелинейного программирования с критериями (4) или (5) при наличии ограничений (1)–(3). Использование критериев (4), (5) при решении задачи многопутевой маршрутизации обеспечивает балансировку нагрузки по длинам очередей, возникающих на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

Исследование предложенной модели маршрутизации

Как известно, для каждого вида трафика в телекоммуникационных сетях характерен свой закон распределения интервалов поступления пакетов (табл. 1) [9, 10]. В результате исследования трафика в современных телекоммуникационных сетях с пакетной коммутацией было замечено, что ему присущи свойства самоподобия, что включает в себя долговременные зависимости, медленно затухающую дисперсию, бесконечные моменты, распределение с «тяжелыми хвостами» (распределение Парето, Вейбулла, логонормальное распределение).

Тип трафика	Уровень ЭМВОС	Закон распределения	
		интервалов поступления	длин протокольных блоков
VoIP	Прикладной	Парето	Парето
FTP/TCP	Транспортный	Парето	Вейбулла, логонормальное
SMTP/TCP	Транспортный	Экспоненциальный	Экспоненциальный
HTTP/TCP	Транспортный	Парето	Логонормальное, Парето
IP	Сетевой	Парето	Парето
Ethernet	Канальный	Парето	Парето
ATM	Канальный	FARIMA	Детерминированный

Таблица 1. Законы распределения интервалов поступления пакетов и длин протокольных блоков на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС)

Классической и довольно изученной моделью массового обслуживания является модель $M/M/1/N$, которая учитывает ограниченность объема буферного ресурса узлов ТКС и характеризуется показательным законом поступления пакетов в сеть и показательным законом их обслуживания [9, 10]. При этом N – максимальное число пакетов, находящихся на интерфейсе маршрутизатора (в очереди и канале). Однако в рамках системы массового обслуживания $M/M/1/N$ моделируются только SMTP/TCP-потоки (табл. 1), а решения при поступающем в сеть трафике со свойствами самоподобия дают большую погрешность.

Иногда для моделирования самоподобного трафика используют систему массового обслуживания $M/D/1/N$ с экспоненциальным законом поступления пакетов и постоянным временем их обслуживания, которая характеризуется постоянной длиной поступающих пакетов, что свойственно лишь отдельным технологиям телекоммуникационных сетей (например, Asynchronous Transfer Mode, ATM) [10].

Чтобы учесть влияние самоподобия, можно использовать систему массового обслуживания $fBM/M/1/N$, которая моделирует поступающий в систему поток с характеристиками фрактального броуновского движения. С этой целью вводится дополнительная функция, зависящая от некоторого коэффициента самоподобия H (коэффициент Херста), причем при $H = 0,5$ свойство самоподобия отсутствует, а при увеличении коэффициента самоподобия до единицы влияние самоподобности нагрузки усиливается. Для расчета средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС $n_{i,j}$, средней задержки пакета $\tau_{i,j}$ в канале $(i, j) \in E$ (согласно формуле Литтла) и вероятности потери пакета $p_{i,j}$ из-за переполнения буфера в рамках модели $fBM/M/1/N$ используют следующие формулы [11]:

$$n_{i,j} = \frac{\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{1 - \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+2}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N+1) \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^N \right\} + N \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}}{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)} - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H), \quad (6)$$

$$\tau_{i,j} = \frac{n_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{f(H) \cdot \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \cdot d_k} + \frac{1}{c_{i,j}} = \frac{1}{\pi c_{i,j}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N+1) \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^N \right\} + N \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}}{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)} + \frac{1}{c_{i,j}}, \quad (7)$$

$$p_{i,j} = \frac{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{1 - \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+2}} \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}, \quad (8)$$

где $\rho_{i,j}$ – загрузка в канале $(i, j) \in E$, а именно: $\rho_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \cdot d_k}{c_{i,j}}$; π – вероятность отсутствия повторной

передачи пакетов; $c_{i,j}$ – пропускная способность канала $(i, j) \in E$; $f(H)$ – функция, которая учитывает влияние самоподобия поступающего в ТКС трафика. Повторная передача пакета возникает, например, когда пакет был отброшен в процессе работы алгоритма произвольного раннего обнаружения (Random early detection, RED).

Рассмотренные формулы (6)–(8) используются для расчета показателей качества обслуживания при входящем в сеть трафике со свойством самоподобия, например, для потоков Ethernet, IP, FTP, НТТР и др.

Для оценки качества конечных решений воспользуемся таким важным показателем QoS, как средняя многопутевая задержка. Задержка $\tau(m_l)$ вдоль пути m_l из множества путей $M = \{m_1, m_2, \dots, m_L\}$, где L – количество путей между маршрутизатором-отправителем и маршрутизатором-получателем, определяется по формуле

$$\tau(m_l) = \sum_{(i,j) \in m_l} \tau_{i,j}.$$

Для расчета межконцевой многопутевой задержки используем выражение [12]:

$$T(M) = \max_{m_l \in M} \{ \tau(m_l) \}, \quad (9)$$

а для расчета межконцевой вероятности доставки пакетов k -го трафика – выражение

$$p^k = \sum_{l=1}^L \left(x^k(m_l) \cdot \prod_{(i,j) \in m_l} (1 - p_{i,j}) \right), \quad (10)$$

где $x^k(m_l)$ – доля k -го трафика, протекающего в пути m_l .

Проведем сравнительный анализ предлагаемой модели с ранее известными решениями. Для этого используем результаты, полученные в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту максимального использования каналов ТКС [5]. Рассмотрим решение задачи маршрутизации для топологий, используемых в сетях SDN, соединяющих центры обработки данных (ЦОД), в которых циркулируют потоки данных высокой интенсивности. Известно, что одним из лидеров по тестированию и внедрению SDN-решений является корпорация Google, которая на сегодняшний день адаптировала свою территориально-распределенную телекоммуникационную сеть (рис. 1), связывающую крупнейшие ЦОД корпорации, под специальный протокол SDN – OpenFlow. Проведем исследование предложенной модели маршрутизации для фрагмента сети корпорации Google (рис. 2).

Для выбранного фрагмента телекоммуникационной сети при решении задачи маршрутизации каналам связи задавались различные значения пропускных способностей. Для примера рассмотрим случай, когда пропускные способности каналов равны числовым значениям, которые показаны на рис. 2 на дугах графа и измеряются в пакетах в секунду (1/с). Так, например, пропускная способность канала связи между первым и вторым маршрутизатором составляет 15 1/с.

Пусть узел-отправитель – это маршрутизатор 1, а узел-получатель – маршрутизатор 5. В сеть поступал трафик различной интенсивности. Результаты сравнения эффективности решений по QoS-показателям (9) и (10), получаемым для предлагаемой модели с критериями (4) и (5) и модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС [5], представлены на

рис. 3, 4. В качестве примера максимальное число пакетов, находящихся на интерфейсе маршрутизатора, равнялось десяти ($N=10$). Для определения функции $f(H)$ был использован линейный закон $f(H) = 2H$ [11], тогда значение данной функции для трафика со свойством самоподобия (например, с коэффициентом Херста $H = 0,75$) равно 1,5. Пусть в сети включен алгоритм произвольного раннего отбрасывания пакетов RED, и его знаменатель граничной вероятности по умолчанию принимает свое максимальное значение 10, т.е. процент отброшенных пакетов равен 10%, и вероятность отсутствия повторной передачи π равна 0,9.

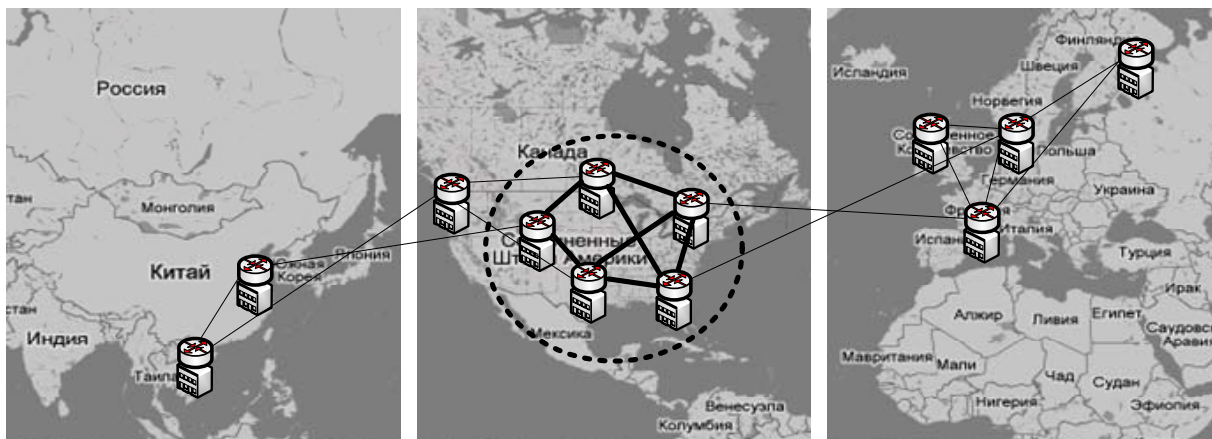


Рис. 1. Телекоммуникационная сеть корпорации Google, которая связывает крупнейшие ЦОД

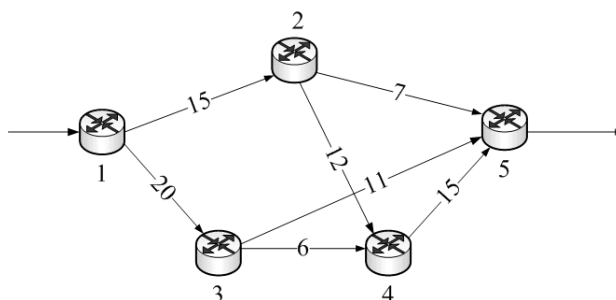


Рис. 2. Фрагмент североамериканского компонента телекоммуникационной сети корпорации Google

В ходе анализа полученных результатов установлено, что при решении задачи многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в рамках предложенной модели с критерием (4) выигрыш по средней многопутевой задержке составил 3,7–5,32 % (рис. 3), а с критерием (5) – 6,3–10,3% по сравнению с решением, полученным в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС.

Вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с балансировкой нагрузки по критерию (4) была улучшена на 1–2,1% (рис. 4), а по критерию (5) – на 1–2% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. Незначительное, на первый взгляд, улучшение вероятности доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с критериями (4) и (5) является достаточно существенным, учитывая тот факт, что должна обеспечиваться вероятность доставки пакетов для сетей IP не ниже 0,999 [1].

При решении задачи маршрутизации для других исходных данных (сетевых структур и пропускных способностей КС) наблюдалась та же закономерность: в рамках предложенной модели маршрутизации с критерием (4) значения многопутевой задержки были улучшены в среднем от 2–4,6% до 5,1–7,3%, а с критерием (5) – в среднем от 5,7–8,3% до 9,5–12,4% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. Вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) была улучшена в среднем от 0,3–0,5% до 1–1,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС [5].

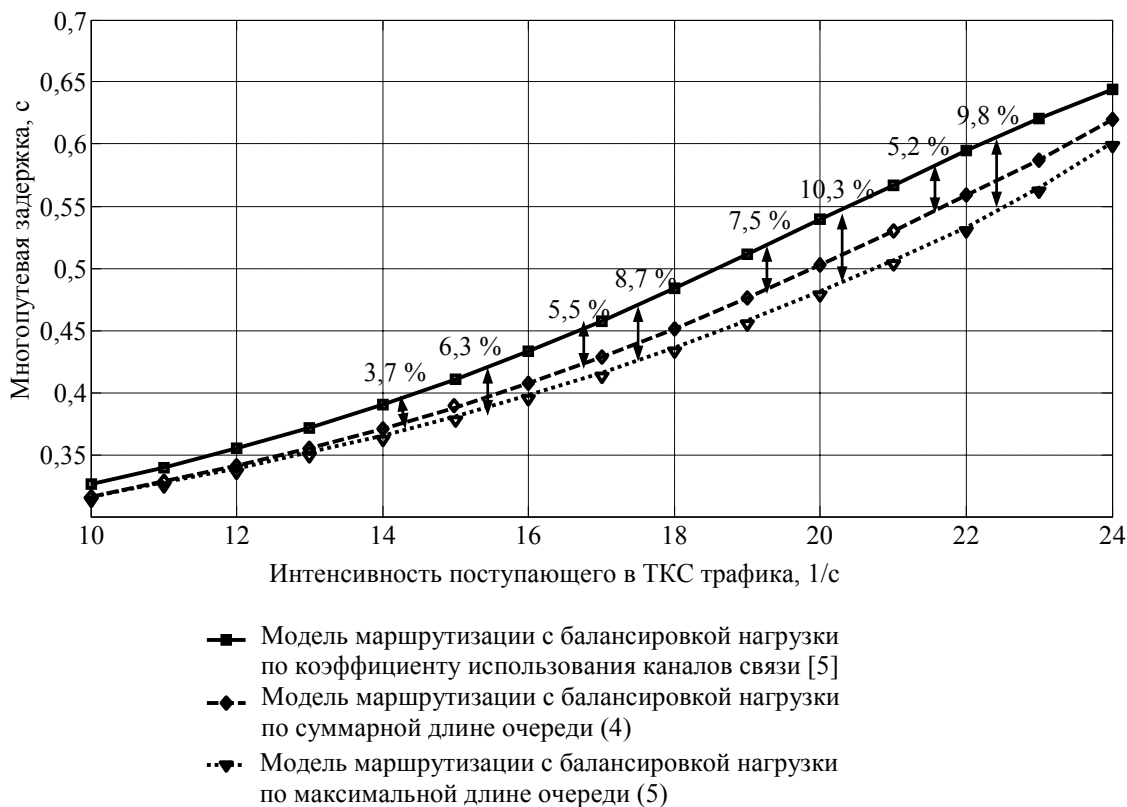


Рис. 3. Результаты сравнения средней многопутевой задержки при решении задачи маршрутизации для разных моделей

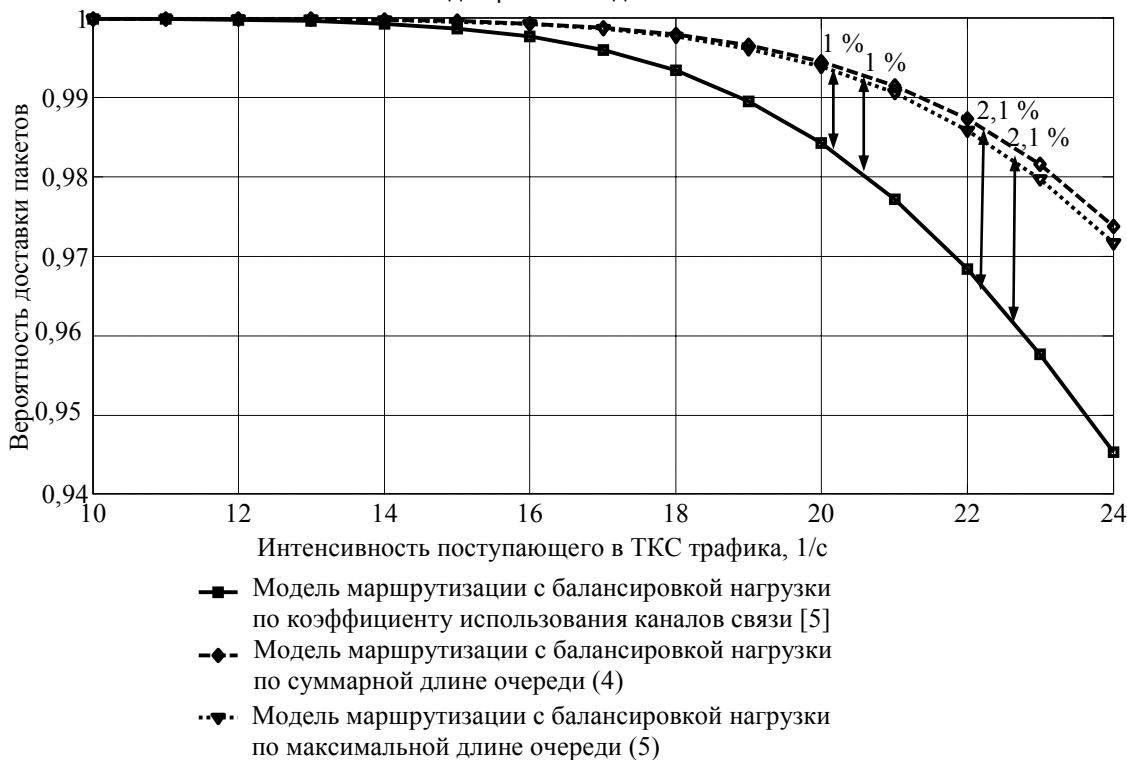


Рис. 4. Результаты сравнения вероятности доставки пакетов при решении задачи маршрутизации для разных моделей

В результате сравнительного анализа рассматриваемых моделей с использованием другой системы массового обслуживания, например, $M/M/1/N$, в рамках которой моделируется SMTP/TCP трафик, были получены подобные результаты. В рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) значения многопутевой задержки были улучшены в среднем от 3,3–9,5% до 11,6–15,7% по сравне-

нию с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. При этом вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) была улучшена в среднем от 0,6–1,3% до 2,3–2,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС.

Таким образом, предложенная модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критериям, связанным с минимизацией длины очереди на маршрутизаторах ТКС, с точки зрения обеспечиваемого качества обслуживания лучше, чем по критерию, связанному с коэффициентом использования каналов ТКС [5]. При сравнении результатов, полученных при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с критериями (4) и (5), сделаны следующие выводы. Средние задержки меньше при решении задачи маршрутизации в рамках модели с критерием (5), а вероятность доставки пакетов выше при решении задачи маршрутизации по критерию (4). Поэтому выбор критерия в модели маршрутизации зависит от QoS-требований того или иного трафика, поступающего в сеть. Например, для трафика реального времени, который выдвигает высокие требования к средним задержкам, рекомендуется использовать модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией максимальной длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС. Если же в сеть поступает трафик, более критичный к потерям пакетов, рекомендуется использовать модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией средней длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

Как показало исследование, преимущественной областью применения модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС является режим высокой и критичной загруженности сети, когда основную роль в значениях задержек пакетов и вероятности их доставки играют процессы образования и обслуживания очередей.

Заключение

В работе предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди для программно-конфигурированных сетей. Проведено исследование предложенной модели с разными критериями оптимальности конечных решений путем ее сравнения с ранее известными решениями для фрагмента сети корпорации Google. Результаты сравнения подтвердили эффективность модели при использовании критерия, связанного с минимизацией максимальной или средней длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационной сети. Использование предложенной модели позволило улучшить значения многопутевой задержки в среднем от 2–4,6% до 9,5–12,4%, а также вероятность доставки пакетов от 0,6–1,3% до 2,3–2,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов телекоммуникационной сети. Наибольшие выигрыши по QoS-показателям замечены при росте интенсивности поступающего в телекоммуникационную сеть трафика, когда на узлах сети возникали очереди. В области малой загруженности сети целесообразно использовать менее сложные модели. Реализация предложенной модели на практике целесообразна именно в программно-конфигурируемых сетях, в которых некоторое усложнение процесса расчета может быть компенсировано более высокой производительностью серверов сетевой операционной системы по сравнению с классическими IP-маршрутизаторами.

Литература

1. Y.1541. ITU-T. Recommendation Y.1541: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks // ITU-T. – Geneva, 2011. – 66 p.
2. Смелянский Р.Л. Программно конфигурируемые сети – основа Интернета нового поколения // Сборник материалов 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012)». – Ростов-на Дону, Южный федеральный университет, 2012. – С. 321–329.
3. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – СПб: BHV, 2002. – 512 с.
4. Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3 (8). – С. 24–46 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
5. Mérindol P., HYPERLINK "http://www.odysci.com/author/1010112984379483/jean-jacques-pansiot"Pansiot J., Cateloin S. Improving Load Balancing with Multipath Routing // Proc. of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE ICCCN 2008. – 2008. – P. 54–61.

6. Лемешко А.В., Вавенко Т.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
7. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16–31 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_lemeshko_tensor.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
8. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
9. Симонина О.А., Яновский Г.Г. Характеристики трафика в сетях IP // Труды учебных заведений связи. – 2004. – № 177. – С. 8–14.
10. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб: БХВ, 2005. – 288 с.
11. Петров М.Н., Пономарев Д.Ю. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С. 35–39.
12. Chen J.-C., Chan S.H. Multipath Routing for Video Unicast over Bandwidth-Limited Networks Department of Computer Science // Proc. of GLOBECOM'01: San Antonio, Texas. – 2001. – V. 3. – P. 1963–1997.

- Вавенко Татьяна Васильевна* – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант, tv_vavenko@mail.ru
- Стерин Вячеслав Леонидович* – Харьковский филиал АО «Киевстар», директор, sterin@journal.kh.ua
- Симоненко Александр Викторович* – Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, соискатель, simonenko@journal.kh.ua

УДК 62-52

ВЫБОР ВАРИАНТОВ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКОВ В ДУБЛИРОВАННОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

Е.А. Алсуфьев, В.А. Богатырев

Проведен анализ вариантов подключения датчиков к управляющим микропроцессорным устройствам в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами. Рассмотрены показатели надежности и стоимости различных технических решений. В качестве предмета для анализа выбрана система температурного контроля, наиболее характерная для систем управления технологическими процессами в различных областях промышленности.

Ключевые слова: датчик, автоматизированная система управления технологическими процессами, вычислительный комплекс, надежность, резервирование.

Введение

Системы автоматизированного управления технологическими процессами, в частности, подсистемы технологического контроля, в большинстве случаев строятся по иерархическому принципу. Нижние уровни иерархии занимают устройства сбора и обработки данных, выполняющие следующие функции:

- первичные измерения;
- представление измеренных величин в виде унифицированных электрических сигналов;
- передача сигналов по линиям связи;
- аналого-цифровое преобразование сигналов;
- обработка сигналов микропроцессорными устройствами, как правило, программируемыми логическими контроллерами (ПЛК).

Для повышения надежности систем компьютерного управления применяется резервирование, что приводит к увеличению стоимости системы. Для нахождения компромисса «надежность–стоимость» представляет интерес исследование вариантов резервирования вычислительных систем и подключаемых к ним датчиков технологических параметров. Варианты построения резервированных вычислительных систем, в том числе дублированных комплексов, исследования их надежности, производительности и безопасности и оптимизация рассматривались в работах [1–7].

Варианты резервированного подключения датчиков

В качестве вариантов резервированного подключения датчиков к дублированным вычислительным устройствам (контроллерам) [1–3] рассмотрим различные комбинации следующих альтернатив:

- подключение n нерезервированных либо n дублированных датчиков;
- подключение каждого датчика по одной либо по двум линиям;
- наличие либо отсутствие связи между дублированными контроллерами.

Рассматриваемые варианты конфигураций представлены на рис. 1.

Условием работоспособности дублированной вычислительной системы [4–6] будем считать возможность обработки всех измеряемых технологических параметров хотя бы в одном вычислительном узле. Для каждой точки измерения может использоваться один или два датчика, а их обработка, в зависимости от конфигурации, может производиться в одном или двух контроллерах.

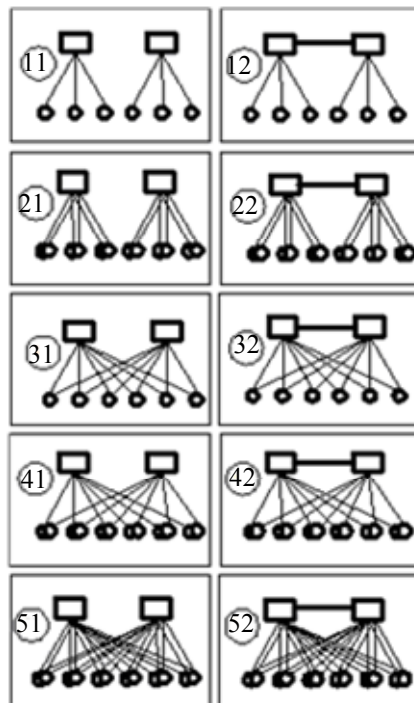


Рис. 1. Варианты подключения датчиков к дублированным контроллерам

Исходные данные и методика расчета

Рассматриваемые структуры состоят из датчиков, контроллеров и кабельных связей между ними. Для расчетов выбраны элементы, на основе которых обычно проектируются системы температурного контроля в промышленности:

- датчики температуры – термометры сопротивления Pt100, подключаемые по трехпроводной схеме;
- соединительные провода – сигнальный многожильный кабель типа КВВГ;
- контроллер – промышленный модульный ПЛК, состоящий из блока питания, процессорного модуля, модулей ввода температурных сигналов и коммуникационного модуля для организации сетевого обмена между контроллерами.

Исходные для расчетов данные надежности представлены в табл. 1.

При расчетах примем расстояние от датчика до места его подключения к ПЛК 100 м; при этом к каждому входному модулю контроллера может быть подключено не более шести датчиков.

Стоимость реализации каждого из вариантов определяется стоимостью двух контроллеров, датчиков и соединительных кабелей. Стоимость контроллера зависит от количества подключаемых к нему датчиков, так как подключение каждого из которых требует отдельного входного модуля. В случаях, когда между контроллерами осуществляется обмен по сети, к стоимости каждого из контроллеров добавляется стоимость коммуникационного модуля

№ п/п	Наименование элемента	Стоимость, руб.	Интенсивность отказов, $\lambda \times 10^6$ 1/ч
1	Датчик температуры Pt100	1100	2
2	Кабель КВВГ	2100	0,1
3	ПЛК, блок питания	9200	7,4
4	ПЛК, процессорный модуль	83000	5,46
5	ПЛК, модуль ввода сигналов	14700	6,25
6	ПЛК, коммуникационный модуль	14800	5,12

Таблица 1. Исходные данные

Варианты 12, 22 (рис. 1) исключены из рассмотрения, так как для них условие работоспособности совпадает с условиями работоспособности в вариантах 11 и 21 соответственно: для варианта 11 – это исправность двух процессоров и всех датчиков и их связей, а для варианта 21 – хотя бы одного датчика в каждой точке измерения. Вариант 52 не рассматривается в связи с его значительной избыточностью по связям.

Вероятность безотказной работы (ВБР) рассматриваемых структур определяется на основе известного метода разложения около особых элементов [8] как

$$\begin{aligned}
 P11(t) &= Pk(t)^2 \cdot (Pd(t) \cdot Pl(t))^n, \\
 P21(t) &= Pk(t)^2 \cdot [1 - (1 - Pd(t) \cdot Pl(t))^2]^n, \\
 P31(t) &= Pd(t)^n \cdot [1 - (1 - Pk(t) \cdot Pl(t))^2]^n, \\
 P32(t) &= Pd(t)^n \cdot [(1 - Ps(t)) \cdot [1 - (1 - Pk(t) \cdot Pl(t))^2] + \\
 &+ Ps(t) \cdot [Pk(t)^2 \cdot [1 - (1 - Pl(t))^2] + 2Pk(t) \cdot (1 - Pk(t)) \cdot Pl(t)^n]], \\
 P41(t) &= 1 - [1 - Pk(t) \cdot (Pd(t) \cdot Pl(t))^n]^2, \\
 P42(t) &= (1 - Ps(t)) \cdot [1 - [1 - Pk(t) \cdot (Pd(t) \cdot Pl(t))^n]^2] + Ps(t) \cdot Pk(t)^2 [1 - (1 - Pl(t) \cdot Pd(t))^2]^n + \\
 &+ 2Pk(t) \cdot (1 - Pk(t)) \cdot (Pl(t) \cdot Pd(t))^n, \\
 P51(t) &= Pk(t)^2 [1 - [1 - Pd(t) [1 - (1 - P(t))^2]^2]^n] + 2 \cdot Pk(t) \cdot (1 - Pk(t)) \cdot [1 - (1 - Pd(t) \cdot Pl(t))^2]^n,
 \end{aligned}$$

где $Pk(t)$, $Pd(t)$, $Pl(t)$, $Ps(t)$ – соответственно ВБР контроллера, датчика, линии передачи сигнала от датчика к контроллеру, связи между контроллерами, n – количество точек измерения.

Имея формулы для оценки ВБР для рассматриваемых конфигураций, можно вычислить наработку на отказ как $T = \int_0^{\infty} P(t) dt$.

Вариант 12 (22) относительно варианта 11 (21) при сформулированных условиях работоспособности является нерациональным, так как связь между контроллерами не позволяет увеличить надежность ввиду ее нереализуемости при отказах хотя бы одного контроллера. Если условия работоспособности формулируются исходя из требования совместной обработки показаний датчиков, подключенных к первому и второму контроллерам, тогда варианты 12 и 22 рассматриваются как потенциально применимые, а варианты 11 и 21 исключаются как неработоспособные. Вероятность безотказной работы вариантов 21 и 22 вычисляются как

$$\begin{aligned}
 P11(t) &= Ps(t)Pk(t)^2 \cdot (Pd(t) \cdot Pl(t))^n, \\
 P21(t) &= Ps(t)Pk(t)^2 \cdot [1 - (1 - Pd(t) \cdot Pl(t))^2]^n.
 \end{aligned}$$

Результаты расчета

Расчет выполнен для системы средних размеров, содержащей 50 точек измерения температуры. Результаты расчета вероятности безотказной работы представлены на рис. 2. На рис. 3 приведены графики вероятности безотказной работы, приведенной к стоимости соответствующего решения.

Эффективность структур с учетом стоимости их реализации определим по коэффициенту K , представляющему собой отношение времени наработки на отказ к стоимости системы. Это отношение определяет количество часов безотказной работы на каждую тысячу рублей, вложенную в аппаратуру системы, т.е. эффективность затрат.

Значения времени наработки на отказ, стоимости и коэффициента K для рассматриваемых конфигураций приведены в табл. 2.

Обозначение варианта	11	21	31	32	41	42	51
Стоимость, тыс. руб.	458,2	631,2	563,2	577,9	631,2	646,0	736,2
Наработка на отказ, ч	4123	4178	7470	7293	6703	7064	11700
Коэффициент K	8,998	6,62	13,263	12,635	10,62	10,935	15,887

Таблица 2. Результаты расчетов

Варианты 11 и 21 для указанных при расчете условиях работоспособности обладают значительно более низким показателем надежности по сравнению с остальными, что делает их применение нерациональным (однако это не исключает целесообразность использования при других условиях работоспособ-

ности системы). Наилучшее отношение времени наработки на отказ к стоимости системы из рассматриваемых конфигураций обеспечивает вариант 51.

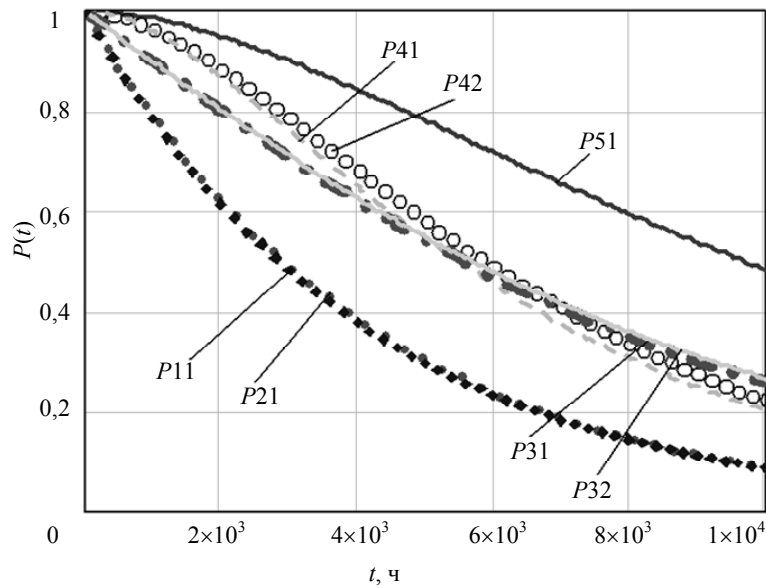


Рис. 2. Вероятность безотказной работы сравниваемых конфигураций

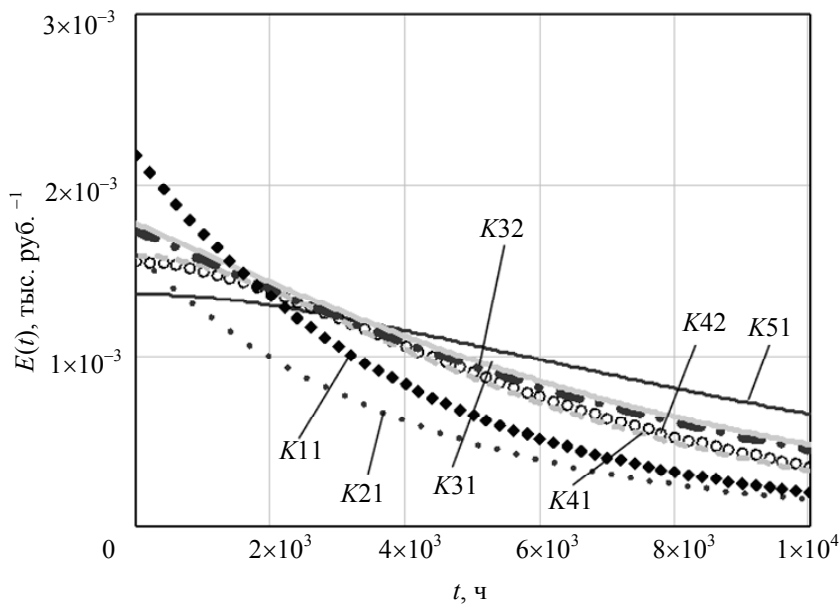


Рис. 3. Вероятность безотказной работы сравниваемых конфигураций, приведенная к их стоимости

Представленные оценки распространяются на достаточно широкий класс комбинаций подключения дублированных и недублированных датчиков через дублированные и нерезервированные связи к одному или двум контроллерам вычислительного комплекса. Варианты оптимального подключения датчиков с учетом расстояний между вычислительными комплексами и датчиками, а также оптимальное разделение датчиков и контроллеров в вычислительные системы кластерной архитектуры [9] требуют дополнительных исследований.

Заключение

Рассмотрены варианты подключения датчиков к дублированной вычислительной системе, оценено влияние вариантов подключения на надежность и эффективность системы. Полученные результаты могут использоваться при выборе и оптимизации вариантов построения систем компьютерного управления в зависимости от количества датчиков и вычислительных узлов.

Литература

1. Богатырев В.А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях // Электронное моделирование. – 1997. – № 3. – С. 21–27.
2. Гатчин Ю.А., Кузнецова О.А. Оценка надежности структурно избыточных изделий при проектировании сложных технических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 45–51.
3. Богатырев В.А., Беззубов В.Ф., Башкова С.А., Полякова А.В., Котельникова Е.Ю., Голубев И.Ю. Надежность дублированных вычислительных комплексов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 6 (76). – С. 74–78.
4. Bogatyrev V.A. Exchange of Duplicated Computing Complexes in Fault tolerant Systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2011. – V. 46. – № 5. – P. 268–276.
5. Богатырев В.А., Бибииков С.В. Оценка функциональной безопасности дублированных вычислительных систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 146.
6. Богатырев В.А. Отказоустойчивые кластеры дублированных вычислительных комплексов // Информационные технологии. – 2012. – № 1. – С. 9–15.
7. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5 (63). – С. 92–98.
8. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие. – СПб: Питер, 2005. – 479 с.
9. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41–48.

Алсуфьев Евгений Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ООО «Ракурс-инжиниринг», начальник научно-исследовательского отдела, alsufyev@mail.ru

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

УДК 615.47, 616-71, 616.12-073.97-71

СИНХРОНИЗАЦИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА С ПОМОЩЬЮ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

М.Я. Марусина, Н. Б. Суворов, А.В. Козаченко, Д.В. Толкович

Представлены результаты разработки многофункционального измерительного комплекса для регистрации физиологических и информационных сигналов, характеризующих психофизиологическое состояние человека в текущий момент времени. Комплекс обеспечивает возможность синхронизации и обработки в реальном времени всех регистрируемых психофизиологических параметров при изучении творческой деятельности испытуемого. Описана схема и состав многофункционального комплекса. Приведены результаты фиксирования и обработки физиологических сигналов, зарегистрированных при напряженной интеллектуальной деятельности.

Ключевые слова: измерительный комплекс, синхронизация, энцефалография, физиологические сигналы, психофизиологические состояния.

Введение

Для исследования психофизиологических состояний человека используется ряд методов, одним из которых является метод видеомониторинга [1]. Видеомониторинг интеллектуальной деятельности – это исследование, в ходе которого проводится длительная синхронная запись электроэнцефалограммы, электрокардиограммы, функции дыхания, видео- и аудиоданных о физиологической, двигательной и поведенческой деятельности испытуемого, включая голосовые реакции. Однако измерительные комплексы видеомониторинга, выпускаемые в настоящее время для нужд научно-практических учреждений здравоохранения, не предназначены для исследования напряженной интеллектуальной деятельности человека, например, творческой деятельности [1, 2].

Процесс интеллектуальной деятельности человека чрезвычайно сложен для инструментальных исследований, так как непосредственно связан с мгновенным или постепенным изменением значительного числа психофизиологических параметров, характеризующих состояние человека в текущий момент времени. Анализ и обработка комплекса психофизиологических параметров, полученных в результате диагностического тестирования, требует соблюдения определенных принципов при их регистрации, главным из которых является синхронизация физиологических, информационных и вспомогательных сигналов во

времени. Такой подход обеспечивает количественный и качественный анализ множества измеренных данных без потери временных ориентиров.

Цель исследования – разработка и создание многофункционального измерительного комплекса для синхронной регистрации и последующей обработки (в режиме реального времени) электрофизиологических сигналов, регистрируемых в ходе изучения напряженной интеллектуальной деятельности человека.

Синхронная регистрация физиологических сигналов

Синхронизируемые в процессе исследования сигналы, регистрируемые измерительным комплексом, можно разбить на две группы: физиологические и информационные. К физиологическим относятся сигналы, связанные непосредственно с описанием психофизиологического состояния испытуемого. Информационные сигналы связаны с регистрацией результатов тестирования. Кроме того, существуют сигналы, которые не относятся к синхронизируемым, но необходимы для оценки состояния. Для оценки психофизиологического состояния испытуемого необходимо зарегистрировать физиологические сигналы:

- электроэнцефалограмма (ЭЭГ) испытуемого – 21 (или более) канал;
- миограмма лицевых мышц – до 8 каналов;
- электрокардиограмма (ЭКГ) испытуемого – от 2 до 12 каналов, в том числе кардиоритмограмма II отведения;
- функция дыхания испытуемого – до 3 каналов;
- артериальное давление испытуемого – 1 канал;
- содержание кислорода в крови (оксигеметрия) – 1 канал;
- сигнал готовности с пульта испытуемого – 1 канал;
- информационные сигналы:
 - аудиоканал испытуемого – 1 канал;
 - аудиоканал оператора – 1 канал;
 - видеопоток камеры испытуемого – 1 канал;
 - видеопоток вспомогательной камеры – 1 канал.

Архитектура разработанного комплекса допускает возможность расширения количества регистрируемых физиологических и информационных сигналов за счет подключения дополнительных датчиков.

Все указанные физиологические сигналы обладают общими свойствами: изменяются во времени, регистрируются как электрические сигналы, изменяются в диапазоне амплитуд 10 мкВ–500 мВ и в диапазоне частот 0–150 Гц. Физиологические сигналы имеют особенности, которые необходимо учитывать при проведении измерений.

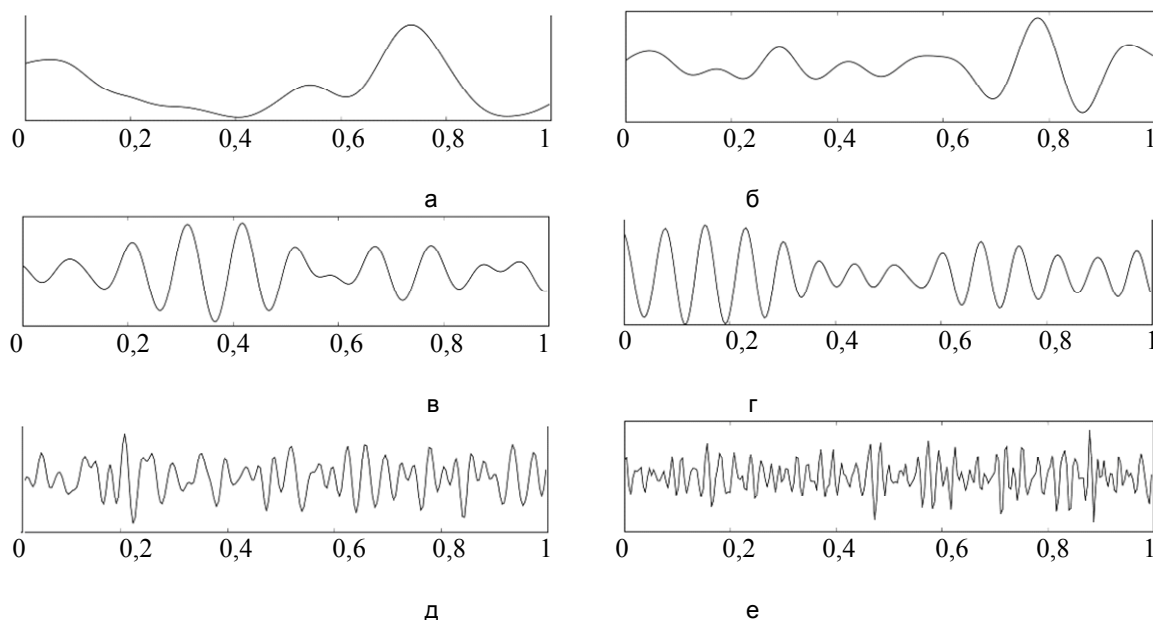


Рис. 1. Электроэнцефалографические ритмы: дельта-ритм (а); тета-ритм (б); альфа-ритм (в); мю-ритм (г); бета-ритм (д); гамма-ритм (е)

Электроэнцефалографический сигнал отличается наибольшей сложностью среди исследуемых физиологических сигналов. Это связано как с большим числом регистрируемых точек на голове испытуемого, так и с амплитудно-частотными особенностями сигнала. Типичный электроэнцефалографический сигнал представляет собой комбинацию сигналов различных видов ритмов, характеризующих работу

головного мозга (дельта-ритм, тета-ритм, альфа-ритм, мю-ритм, бета-ритм, гамма-ритм). Примеры ритмов показаны на рис. 1.

Известно, что умственные нагрузки приводят к изменению амплитудно-частотных параметров всех вышеуказанных ритмов ЭЭГ. Электрокардиографический сигнал на текущий момент один из наиболее полно изученных физиологических сигналов. ЭКГ позволяет изучить автоматизм, возбудимость, проводимость и сокращательную функцию миокарда, что дает возможность косвенно оценивать уровень нагрузки испытуемого.

Миограмма – метод исследования биоэлектрической активности мышц и нервов. В рамках данного комплекса он применяется для компенсации искажений, наложенных на энцефалограмму вследствие активности лицевых мышц испытуемого.

Состав и схема комплекса

Для решения проблемы синхронизации регистрируемых физиологических сигналов была проведена модификация биотехнической системы, описанной в работах [3, 4]. В указанных статьях представлен специализированный информационно-измерительный комплекс, предназначенный для анализа результатов напряженной интеллектуальной деятельности на примере игры в шахматы. Комплекс позволяет для полученных результатов соотнести шахматную позицию и психофизиологические параметры испытуемого в любой момент времени. Недостатками комплекса [3, 4] являются невозможность синхронизации данных в режиме реального времени и отсутствие синхронизации между главным и шахматным компьютерами.

В отличие от прототипа, разработанный многофункциональный измерительный комплекс обеспечивает возможность синхронизации в реальном времени всех регистрируемых сигналов – ЭЭГ, ЭКГ, пневмограммы (ПГ), аудио- и видеосигналов и т.д. Кроме того, разработанный измерительный комплекс обеспечивает возможность обработки сигналов в реальном времени (разложение сигналов в спектры, применение вейвлет-анализа, получение динамических спектральных характеристик и т.д.). Исследования информативности вейвлет-анализа многоканальной электроэнцефалограммы шахматистов, позволившего с высоким разрешением получить динамические спектральные характеристики во время обдумывания хода шахматной партии, были представлены в работах [3, 4].

Как указывалось ранее, при исследованиях с помощью разработанного комплекса регистрируется как физиологические, так и информационные сигналы. Информационные сигналы, не задействованные напрямую в ходе измерения физиологических сигналов, также регистрируются аппаратно-программным комплексом на базе персонального компьютера и впоследствии синхронизируются с физиологическим сигналами с помощью специально разработанного программного обеспечения, путем совмещения временных меток.

Согласно определению биотехнической системы, разработанный комплекс, представленный в виде схемы на рис. 2, состоит из модулей регистрации сигналов, устройства обработки информации (компьютера), испытуемого и оператора.

Рассмотрим модули подробнее.

Модуль регистрации сигналов представляет собой многоканальный регистратор (самописец), к которому подключены датчики для регистрации различных физиологических сигналов.

В состав комплекса входят следующие типы датчиков:

ЭЭГ – типовой комплект электродов для регистрации электроэнцефалограммы испытуемого, сгруппированный в виде шапочки, согласно схеме «10–20»;

ЭКГ – типовой комплект электродов для регистрации электрокардиограммы испытуемого согласно стандартным схемам;

ЭМГ – типовой комплект электродов для регистрации физиологической активности мышц лица;

П – датчик регистрации пульса испытуемого, необходимый для регистрации пульса и последующей синхронизации кардиосигналов с сигналами мозговой деятельности;

Д – датчик регистрации дыхания испытуемого, необходимый для регистрации параметров дыхания и последующей синхронизации их с сигналами мозговой деятельности;

Кп – кнопочный пульт испытуемого, представляющий собой бокс с двумя кнопками и предназначен для создания дополнительных временных меток (испытуемый нажимает на кнопку при готовности ответить);

К – датчик регистрации кислорода в крови испытуемого, необходимый для оценки энергозатрат при напряженной когнитивной деятельности;

А – датчик артериального давления, предназначенный для регистрации давления испытуемого в режиме реального времени;

П – датчик регистрации пульса испытуемого, предназначенный для оценки частоты сердечных сокращений в единицу времени.

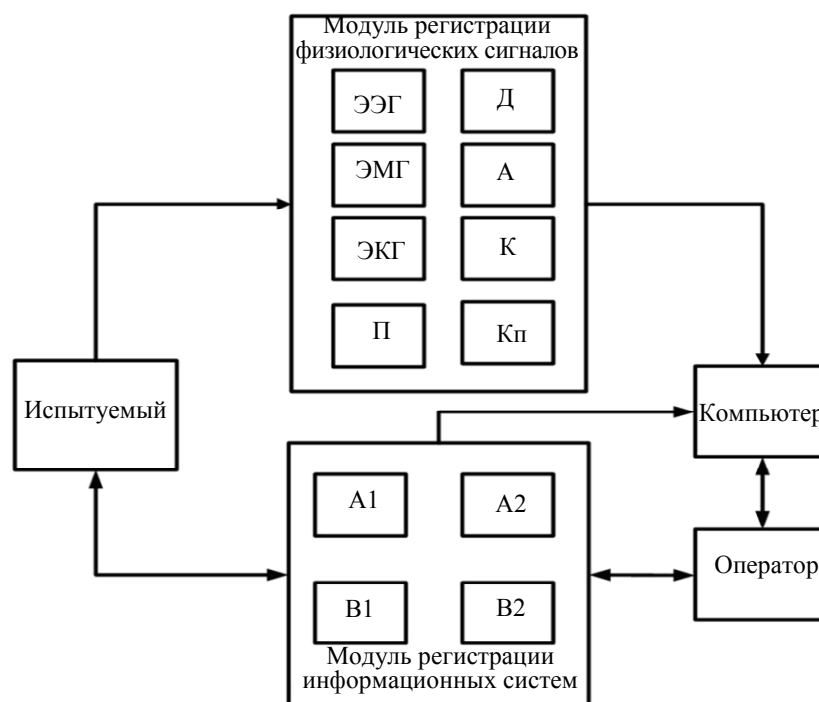


Рис. 2. Схема комплекса

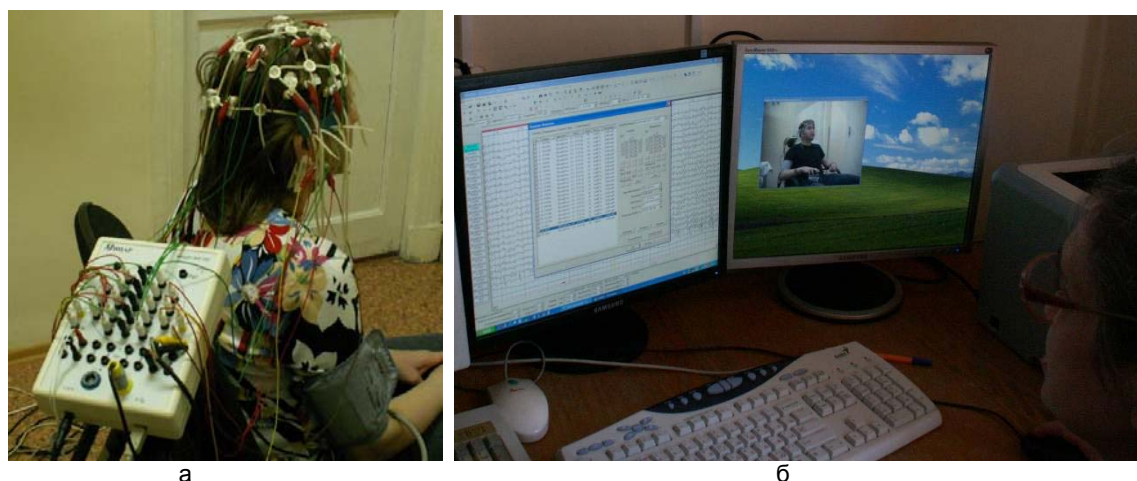


Рис. 3. Компоненты комплекса: модуль регистрации физиологических сигналов и электроды на голове испытуемого (а); оператор обрабатывает результаты на компьютере (б)

Модуль регистрации информационных сигналов предназначен для регистрации состояния испытуемого и аудио – визуальных воздействий на него. В состав модуля входят следующие системы:

А1 – аудиосистема испытуемого, предназначена для регистрации аудиосигналов (голоса) испытуемого о готовности к выполнению заданий и о результатах выполнения заданий (ответ на задачу);

А2 – аудиосистема оператора, предназначена для регистрации инструкций испытуемого и наложения аудиометок по времени подачи инструкций на тайм-ленту исследования (где синхронизируется с сигналами мозговой деятельности). Система громкоговорителей предназначена для стимуляции испытуемого и подачи команд оператора.

В1 – видеокамера, предназначена для регистрации состояния испытуемого с целью последующей синхронизации физиологических сигналов и видеоряда;

В2 – вспомогательный видеорегистратор, предназначен для фиксации и последующей визуализации задач, поставленных перед испытуемым.

Результаты работы комплекса

Все испытуемые перед проведением исследований подписали информированное согласие.

Примеры результатов работы фиксирования и обработки сигналов, зарегистрированных с помощью комплекса, представлены на рис. 4–7.

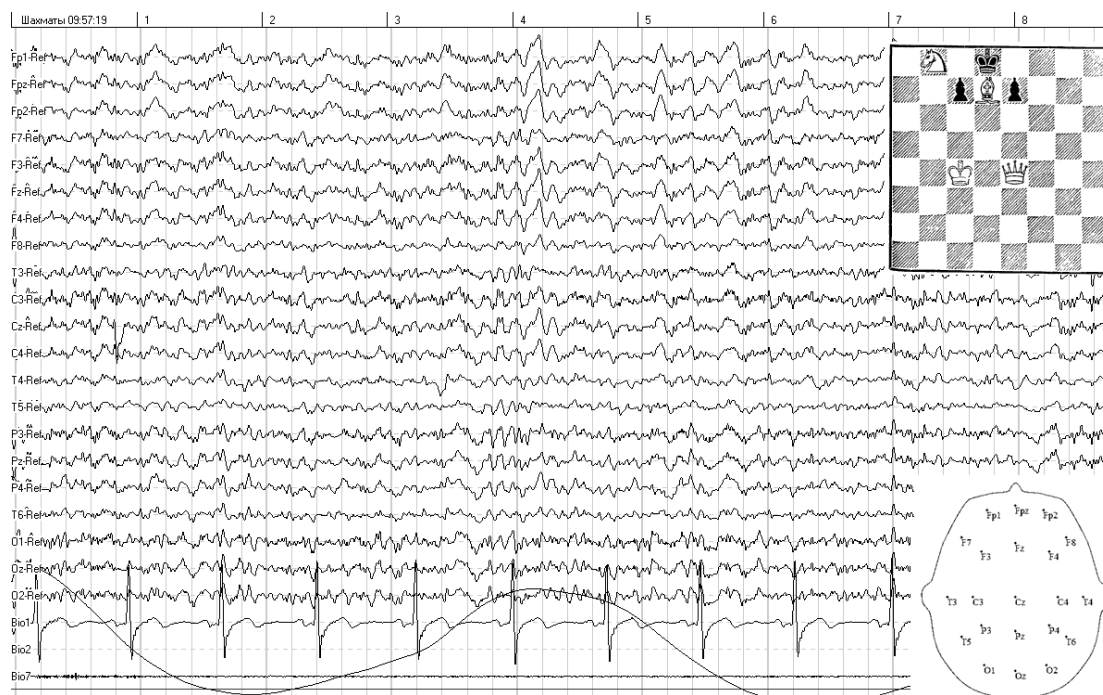


Рис. 4. Фрагмент регистрации физиологических сигналов (ЭЭГ, ЭКГ и пневмограмма)

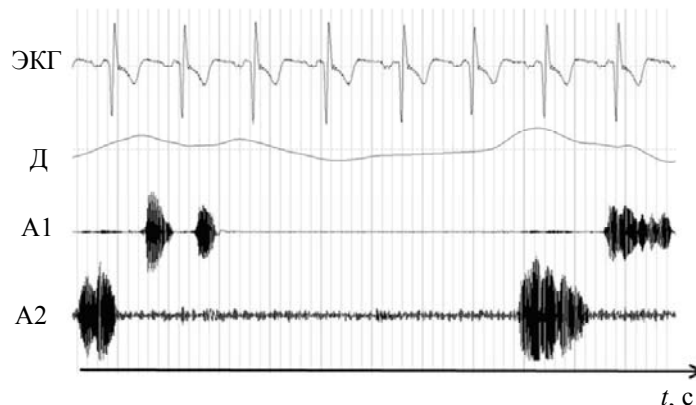


Рис. 5. Фрагмент регистрации физиологических и информационных сигналов:
Д – дыхание; А1 – аудиосигнал испытуемого; А2 – аудиосигнал оператора

На рис. 4 показан скриншот регистрации различных электрофизиологических сигналов – 21 отведение (канал) электроэнцефалограммы при решении шахматной задачи с закрытыми глазами. Справа сверху наложена позиция шахматной задачи (автор Г. Заходякин, 1949 г., позиция приведена по материалам [5]), справа внизу указана схема расположения электродов «10–20%» по Джасперу. Электроды, маркированные индексом *F*, относятся к лобным отделам головного мозга, *C* – центральные, *P* – теменные, *T* – височные, *O* – затылочные. *Bio1* (электрокардиограмма) регистрируется двумя электродами, зафиксированными на предплечьях испытуемого, *Bio2* фиксирует функцию дыхания (пневмограмму) испытуемого, регистрируемую термодатчиком. В верхней строке указаны режим и время исследования: интервал отметок времени между вертикальными линиями составляет 0,2 с.

На рис. 5 показана синхронная фиксация электрофизиологических и информационных сигналов. В качестве физиологических сигналов использованы сигналы кардиограммы (ЭКГ) и дыхания (Д), а в качестве информационных – фрагмент общения между оператором (А2) и испытуемым (А1). Также регистрируется информация с видеоканала испытуемого (В1) и вспомогательный видеосигнал (В2) (визуализация задач, поставленных перед испытуемым).

На рис. 6 приведен один из видов обработки зарегистрированных электрофизиологических сигналов – спектральный Фурье-анализ. Эпоха анализа равнялась 30 с, усреднялись спектры мощности четырехсекундных фрагментов с наложением 50%. Внизу (рис. 6, б) приведены топограммы распределения по поверхности головы двух доминирующих гармоник, лежащих в диапазоне альфа-ритма.

На рис. 7 представлены результаты кросскорреляционного анализа электрофизиологических сигналов. Этот вид обработки сигналов необходим для выявления взаимосвязи между отдельными каналами

регистрации сигналов. В процессе преобразования используется информация, полученная с электродов для регистрации ЭЭГ. Для выявления корреляции между зонами головного мозга (отведениями) ЭЭГ-сигналов была проведена предварительная синхронизация физиологических сигналов в заданном интервале времени.

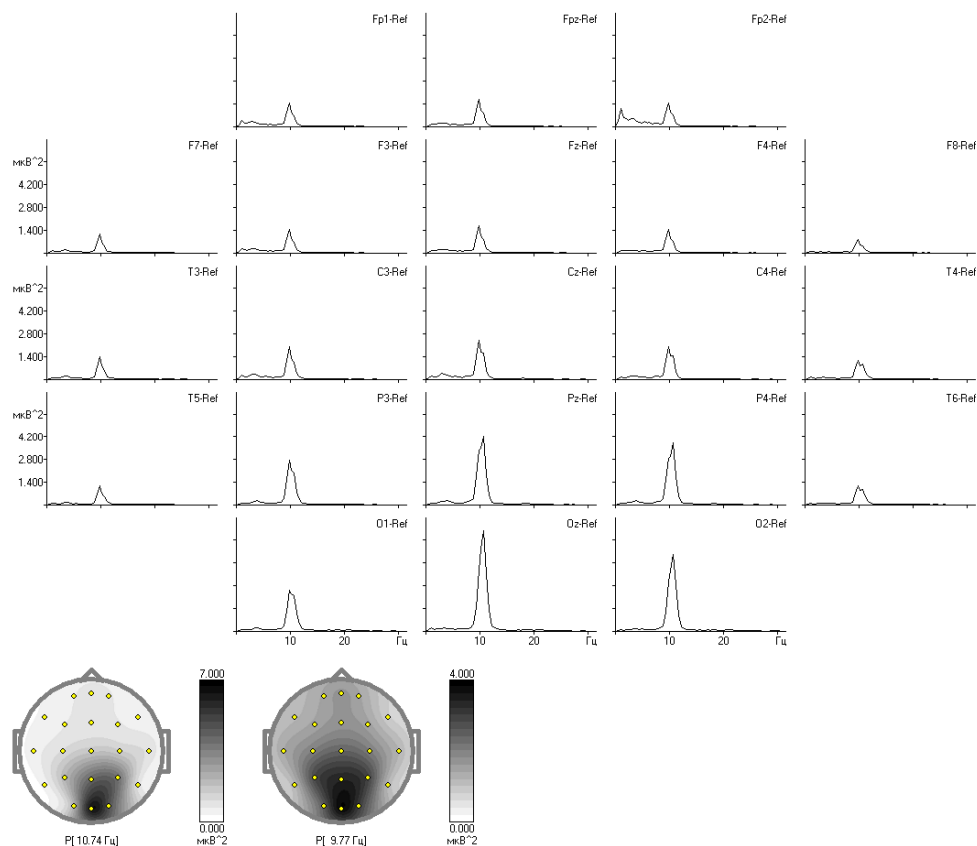


Рис. 6. Разложение фрагмента ЭЭГ (состояние расслабленного бодрствования с закрытыми глазами) на спектральные составляющие: спектры сигналов по отведениям (а); топограммы распределения отдельных гармоник (б)

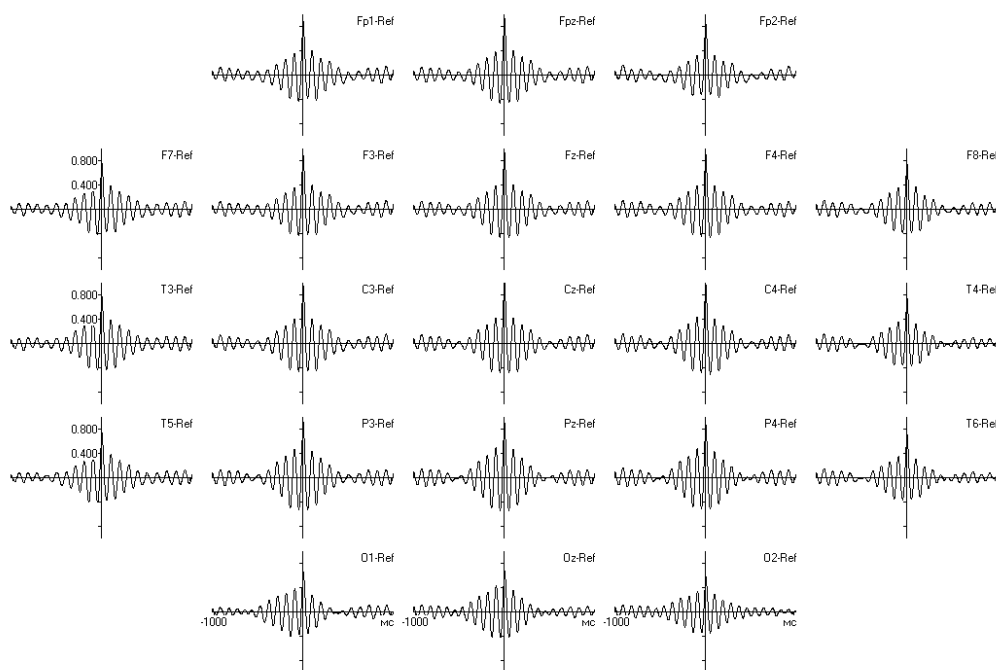


Рис. 7. Кросскоррелограммы того же фрагмента ЭЭГ

Заключение

Предложенная модификация биотехнической системы с помощью синхронизации физиологических сигналов в режиме реального времени и дополнительное введение аудиоканалов и видеоканалов в измерительный комплекс позволяют повысить качество психофизиологических исследований. Синхронная регистрация и последующая обработка данных без потери временных ориентиров позволит специалистам провести качественный и количественный анализ набора физиологических параметров. Научные результаты, полученные на разработанном многофункциональном комплексе, являются инструментом для психофизиологических исследований механизмов напряженной интеллектуальной деятельности.

Дальнейшие исследования, планируемые совместно с физиологами ФГБУ «НИИЭМ» СЗО РАМН, предполагают проведение экспериментов для уточнения параметров синхронизации физиологических и информационных сигналов, а также оценку степени взаимовлияния различных психофизиологических параметров, характеризующих состояние испытуемого в текущий момент времени.

Работа выполнена в ходе проведения НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме «Исследование нестационарных физиологических сигналов и изображений при интеллектуальной деятельности с помощью многофункционального диагностического измерительного комплекса».

Литература

1. Иванов Л.Б. Прикладная компьютерная электроэнцефалография. – М.: Научно-медицинская фирма МБН, 2004. – 2-е изд. – 352 с.
2. Психофизиология: Учебник для вузов / Под ред. Ю.И. Александрова. – 3-е изд., доп. и перераб. – СПб: Питер, 2012. – 464 с.
3. Суворов Н.Б., Абрамов В.А., Козаченко А.В., Полонский Ю.З. Биотехническая система для изучения интеллектуальной деятельности человека // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 5 (48). – С. 70–77.
4. Анодина-Андриевская Е.М., Божокин С.В., Марусина М.Я., Полонский Ю.З., Суворов Н.Б. Перспективные подходы к анализу информативности физиологических сигналов и медицинских изображений человека, при интеллектуальной деятельности // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. Т. 54. – № 7. – С. 27–34.
5. Тишков А.А., Чепижный В.И. Шахматные задачи-миниатюры. – М.: Физкультура и спорт, 1987. – 336 с.

<i>Марусина Мария Яковлевна</i>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, marusina_m@mail.ru
<i>Суворов Николай Борисович</i>	– ФГБУ «НИИЭМ» СЗО РАМН, доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией, nbsuorov@yandex.ru
<i>Козаченко Александр Викторович</i>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a_kozachenko@mail.ru
<i>Толкович Дмитрий Владиславович</i>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, PUVY@inbox.ru

УДК 535.14, 57.043

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА 0,05-1,2 ТГц НА МЕМБРАННЫЙ
ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ****М.В. Цуркан, И.В. Кудрявцев, М.К. Серебрякова, Ю.С. Несговорова, А.С. Трулёв,
И.В. Назарова, О.А. Смолянская, П.Г. Назаров, А.В. Полевщиков**

В последние годы стремительно растет область применения источников терагерцового (ТГц) излучения. Так, предполагается его использование в медицинской диагностике заболеваний кожи и рака. Однако разнонаправленные данные по влиянию ТГц излучения ставят под вопрос безопасность его применения. Для оценки воздействия ТГц излучения на клеточном уровне с помощью проточной цитометрии исследовалось его влияние на мембранный потенциал митохондрий и проницаемость клеточной мембраны клеток некоторых перевиваемых культур, а также тимоцитов и спленоцитов мышей. Было показано, что ТГц излучение мощностью 30; 2 и 0,1 мВт и длительностью 1 мин не оказывает существенного влияния на изменение функциональной активности митохондрий клеток, равно как и не нарушает целостности их билипидных поверхностных мембран. В том числе не обнаружено статистически достоверных изменений в соотношении живых и находящихся на разных стадиях апоптоза клетках.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, медицина, биологические эффекты, мембранный потенциал, проницаемость мембраны.

Введение

Терагерцовое (ТГц) излучение занимает участок электромагнитного спектра между инфракрасным и микроволновым излучением с диапазоном частот 0,1–10 ТГц (длины волн от 30 мкм до 3 мм). Интерес к ТГц излучению обусловлен характерными свойствами данного излучения: в этом диапазоне находится значительная часть колебательно-вращательного спектра воды и многих органических молекул, в том числе биологически активных макромолекул (белков и нуклеиновых кислот), а также частоты межмолекулярных взаимодействий [1, 2]. Чувствительность ТГц излучения к содержанию воды делает возможным его применение в диагностических целях. Так, было показано, что с помощью ТГц изображения возможно выявить области рака кожи и рака молочной железы, оценивать степень ожоговых ран [3].

В связи с тем, что ТГц излучение имеет низкую энергию фотона, оно считается безвредным для человека, что и позволяет применять его для медицинской диагностики. Однако авторы многих работ отмечают наличие биологических эффектов излучения на различных уровнях биологической организации. Этой теме посвящены несколько подробных обзоров [4, 5]. Разнонаправленные данные по влиянию ТГц излучения ставят под вопрос безопасность его применения для медицинской диагностики, в особенности в вопросе о диагностике рака, так как в этом случае необходимо соблюдать предельную осторожность, чтобы не спровоцировать ускоренное развитие заболевания.

Опираясь на вышесказанное, целью своей работы авторы ставят изучение воздействия широкополосного ТГц излучения диапазона 0,05–1,2 ТГц на мембранный потенциал митохондрий и проницаемость клеточной мембраны некоторых перевиваемых культур, а также тимоцитов и спленоцитов мышей линии СВА с помощью проточной цитометрии.

Состояние исследований в данной области

Рассмотрим работы, посвященные изменению мембранного потенциала клеток и проницаемости мембраны под действием ТГц излучения.

Излучение на частоте 2,5 ТГц вызывает нарушение морфологии мембран и внутриклеточных структур и падение мембранного потенциала нейронов [6], а излучение на частоте порядка 2,31 ТГц может вызывать обратимые нарушения барьерных свойств мембраны нейронов [7]. Однако другими исследователями на этом же объекте при облучении излучением с частотой порядка 0,6 и 0,75 ТГц было показано, что все изменения являются следствием исключительно повышения температуры [8]. Эффект повышения проницаемости клеточной мембраны был получен при воздействии ТГц излучения с частотой 2,52 ТГц, 227 мВт/см² свыше 12 с, а понижения – при уменьшении длительности облучения [9].

Липидный бислой показал увеличение проницаемости мембраны при использовании импульсного источника (0,13 ТГц, 7 Гц, 7,7 мВт/см², 2 мин) и отсутствие каких-либо эффектов при источнике непрерывного излучения [10].

Исследователи наблюдали как блокирование, так и усиление нейронной активности при воздействии излучения на частоте 0,06 ТГц в течение 1 мин при низкой плотности мощности (0,07, 0,28, 0,56 и 0,74 мВт/см²) [11]. Также этими авторами было показано, что излучение с частотой порядка 0,05 ТГц (15 мВт/см², 2 мин) индуцирует открытие ионных каналов во время воздействия и их запечатывание спустя 3 мин после окончания воздействия [12].

Таким образом, приведенные исследования свидетельствуют о том, что ТГц излучение повышает проницаемость мембраны и приводит к изменению мембранного потенциала. Однако большинство этих данных было получено с использованием непрерывных источников излучения, и вопрос влияния импульсного широкополосного ТГц излучения остается открытым. Этим и обусловлена актуальность проводимой нами работы.

Материалы и методы

Оптическая схема экспериментальной установки ТГц фотометра представлена на рис. 1. Излучение фемтосекундного лазера 1 попадает через систему зеркал на кристалл InAs 5. Часть излучения, прошедшая через светоделительную кремниевую пластину 7, фокусируется на оптико-акустический приемник 11 для оперативного слежения за выходной мощностью (ТГц) без прерывания облучения объектов. Другая часть излучения, отраженная от кремниевой пластины, попадает на второе параболическое зеркало 8, которое направляет излучение (сходящийся пучок) вверх на объект 9. Такая схема разработана нами для облучения объектов, находящихся в жидкой среде. Потери ТГц излучения на планшете, в котором находились клетки, составили 20%. Генерируемое ТГц излучение имело полосу частот 0,05–1,2 ТГц. Мощность ТГц излучения варьировалась с помощью фильтров и с учетом поглощения планшетом составляла 30; 2; 0,1 мкВт. Площадь облучения составляла 3,14 см², соответственно плотность мощности – 9,55; 0,63; 0,03 мкВт/см². Длительность импульса – 2,5 пс. Эксперименты проводились при температуре 20 °С. Длительность облучения составляла 1 мин. Для каждой культуры клеток было проведено 3 серии экспериментов. В каждой серии облучение на каждой мощности проводилось 3 раза. Таким образом, на каждой мощности каждая культура клеток была облучена 9 раз, и ей соответствовали по 3 контрольных лунки, которые не подвергались действию облучения.

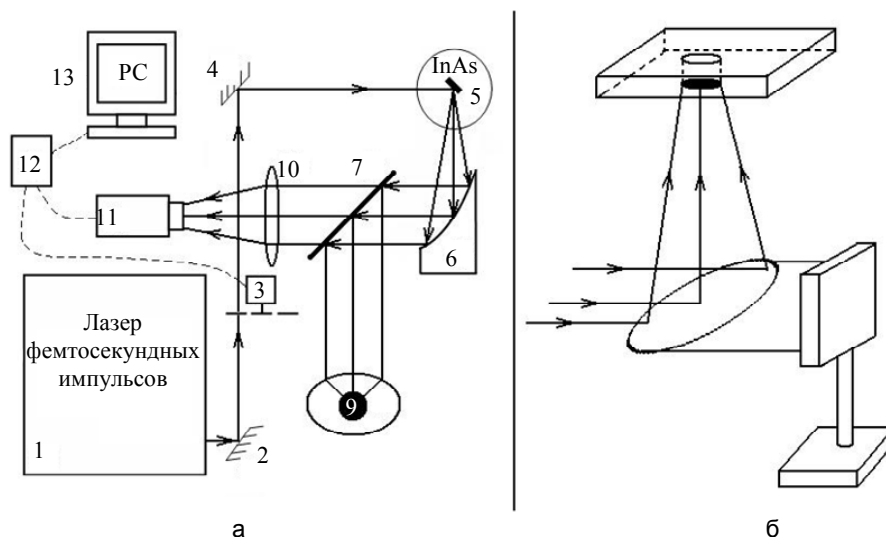


Рис. 1. Блок-схема ТГц фотометра: вид сверху (а); элементы 8, 9, вид сбоку (б):

- 1 – фемтосекундный лазер; 2, 4 – зеркала; 3 – механический модулятор; 5 – магнит с размещенным внутри кристаллом InAs (угол падения излучения 45°); 6, 8 – параболические зеркала; 7 – светоделительная кремниевая пластина; 9 – объект, помещенный в ячейку планшета; 10 – линза; 11 – оптико-акустический приемник; 12 – синхронный усилитель; 13 – персональный компьютер

Культуры клеток перевиваемых линий и условия культивирования клеток

В качестве объектов исследования были выбраны культуры клеток следующих перевиваемых линий:

- адгезионные культуры – А-549 (клетки карциномы легкого человека);
- BT-20 (клетки аденокарциномы молочной железы);
- COLO 320 HSR (клетки карциномы сигмовидной кишки);
- суспензионные культуры – НМС-1 (линия клеток, обладающая свойствами незрелых тучных клеток);
- U937 (клеточная линия лейкоза гистиоцитов человека),
- HL-60 (клетки промиелоидной лейкемии человека).

Для культивирования клеток линии А-549 и BT-20 использовали аналогичные пластиковые флаконы объемом 50 мл, использовали среду DMEM («Биолот», Санкт-Петербург) с добавлением 10% инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки (ЭТС) («Биолот», Санкт-Петербург), 50 мкг/мл гентамицина («Биолот», Санкт-Петербург) и 2 мМ L-глутамина («Биолот», Санкт-Петербург). Для ведения клеток использовали пластиковые флаконы объемом 50 мл («Sarstedt», Германия). Клетки пересевали каждые 3–4 дня. Инкубацию осуществляли при 37°С в атмосфере 5% CO₂. Для постановки эксперимен-

тов клетки пересевали в лунки 24-луночных плоскодонных планшета («Sarstedt», Германия), инкубировали до формирования конфлюэнтного монослоя.

Культивирование клеток линии COLO 320 HSR осуществляли при следующих условиях: среда RPMI-1640 («Биолот», Санкт-Петербург) с добавлением 10% инактивированной ЭТС («Биолот», Санкт-Петербург), 50 мкг/мл гентамицина («Биолот», Санкт-Петербург) и 2 мМ L-глутамин («Биолот», Санкт-Петербург). Пересев производили каждые 2–3 дня. Клетки инкубировали при 37°C в атмосфере 5% CO₂. Для постановки экспериментов клетки пересевали в лунки 24-луночного плоскодонного планшета («Sarstedt», Германия), инкубировали до формирования монослоя. После облучения к монослою клеток указанных выше линий добавляли по 500 мкл соответствующей полной культуральной среды (ПКС) и инкубировали при 37°C в атмосфере 5% CO₂ в течение 24 ч. Для дезинтеграции монослоя добавляли раствор аккутазы («Sigma-Aldrich», США). По завершении инкубации лунки планшетов промывали забуференным фосфатами физиологическим раствором (ЗФР, pH 7,2–7,4), содержащим 2% ЭТС. Полученную суспензию клеток переносили в пробирки для центрифугирования и дважды отмывали избытком ЗФР (300g в течение 8 мин). Полученную суспензию клеток использовали для постановки экспериментов, описанных ниже.

Культивирование клеток линий ТНР-1, HL-60 и U-937 осуществляли с использованием среды RPMI-1640 с добавлением 10% инактивированной ЭТС, 50 мкг/мл гентамицина и 2 мМ L-глутамин (указанных выше производителей). Пересев производили каждые 2–3 дня. Ведения клеток проводили по описанной выше методике.

Для культивирования клеток линии НМС-1 использовали среду Iscove (Iscove's Modified Dulbecco's Medium, IMDM, «Hyclone», США) с добавлением 10% обогащенной ионами железа ЭТС («Hyclone», США), 1,2 мМ монотиоглицерола («Sigma», США) и 40 мкг/мл гентамицина («Биолот», Санкт-Петербург). При постановке экспериментов в лунки 24-луночного плоскодонного планшета вносили 200 мкл клеточной суспензии (3×10^6 клеток/мл) в соответствующей ПКС. После облучения к клеткам указанных выше линий добавляли по 500 мкл соответствующей ПКС и инкубировали их при 37°C в атмосфере 5% CO₂ в течение 24 ч. По завершении инкубации лунки планшетов промывали охлажденным ЗФР, содержащим 2% ЭТС. Затем суспензию клеток переносили в пробирки для центрифугирования объемом 15 мл и дважды отмывали избытком ЗФР (300g в течение 8 мин). Полученную суспензию клеток использовали для постановки экспериментов, описанных ниже.

В качестве объектов исследования были использованы мыши линии СВА, массой 18–20 г. Для получения образцов тимоцитов и спленоцитов животных умерщвляли методом цервикальной дислокации и сразу же извлекали тимус и селезенку. Полученные органы гомогенизировали, полученную клеточную суспензию фильтровали через фильтры с диаметром поры не более 100 мкм, после чего тимоциты и спленоциты дважды отмывали избытком ЗФР (300g в течение 8 мин). Далее клетки переводили в полную культуральную среду, приготовленную на основе DMEM с добавлением 10% инактивированной ЭТС, 50 мкг/мл гентамицина и 2 мМ L-глутамин. При постановке экспериментов в лунки 24-луночного плоскодонного планшета вносили 200 мкл клеточной суспензии (5×10^6 клеток/мл) в ПКС. После облучения к культурам спленоцитов и тимоцитов добавляли по 250 мкл ПКС и инкубировали при 37°C в атмосфере 5% CO₂ в течение 3 ч. По завершении инкубации в лунки планшетов вносили охлажденный ЗФР, содержащий 2% ЭТС. Затем суспензию клеток переносили в пробирки для центрифугирования, дважды отмывали избытком ЗФР (300g в течение 8 мин). Полученную суспензию клеток использовали для постановки экспериментов, описанных ниже.

Оценка мембранного потенциала митохондрий и проницаемости клеточной мембраны при помощи проточной цитометрии

Принцип метода. Метод основан на использовании двух флуоресцентных красителей – йодида 3,3'-дигексилосакарбодиамина (DiOC₆(3)) и йодистого пропидия (PI). DiOC₆(3) относится к группе катионных липофильных красителей, которые в литературе получили название «митохондриальных зондов», так как применяются для изучения мембранного потенциала митохондрий клеток [13]. Благодаря своим липофильным свойствам DiOC₆(3) способен свободно проникать через билипидные мембраны клетки (поверхностную мембрану клетки, а также внешнюю и внутреннюю мембраны митохондрий), а благодаря катионным свойствам этот краситель накапливается в областях с высокой концентрацией протонов, т.е. под внутренней мембраной митохондрий. Этот эффект сопровождается изменением интенсивности флуоресценции клеток в зеленой части спектра, что и регистрируют при анализе на проточном цитофлуориметре [14]. В том случае, если концентрация протонов снижена, как это имеет место на начальных этапах физиологической смерти клетки – апоптоза, то краситель будет накапливаться в них менее эффективно, и, как следствие, интенсивность его флуоресценции будет снижена. Тем самым, можно отличить живые клетки с эффективно функционирующими митохондриями (и, как следствие, высокой интенсивностью флуоресценции) от гибнущих или мертвых клеток, в которых функционирование митохондрий нарушено. Как следствие, такие клетки обладают пониженной интенсивностью флуоресценции.

В том случае, если деполяризация митохондрий рассматривается как «раннее» событие при запуске апоптоза, то нарушение целостности поверхностной мембраны (т.е. ее фрагментация) обычно характерно для клеток, находящихся на терминальных стадиях гибели. В связи с этим для выявления разных стадий апоптоза, помимо DiOC₆(3), клетки дополнительно окрашиваются PI – красителем, способным взаимодействовать с нуклеиновыми кислотами клеток. PI не способен диффундировать через билипидные мембраны и, как следствие, не способен связаться с ДНК клеток. Однако по мере фрагментации цитоплазматической и ядерной мембран краситель проникает в клетку и взаимодействует с РНК и ДНК. Следствием подобного взаимодействия является накопление красителя в цитоплазме и ядре, и клетка обретает флуоресценцию в красной части спектра.

Таким образом, живые клетки будут обладать яркой флуоресценцией по каналу, предназначенному для детекции DiOC₆(3), но не будут накапливать йодистый пропидий (фенотип DiOC₆(3)^{bright}PI). Клетки, находящиеся на ранних стадиях апоптоза (митохондриальный потенциал снижен, но плазматическая мембрана еще сохраняет свою целостность и непроницаемость для йодистого пропидия) будут иметь фенотип DiOC₆(3)^{dim-to-neg}PI. Вместе с тем, клетки, находящиеся на поздней стадии апоптоза или уже погибшие (некроз), не будут эффективно накапливать DiOC₆(3), но будут окрашиваться PI – фенотип DiOC₆(3)^{dim-to-neg}PI⁺.

Процедура окрашивания клеток. Для оценки мембранного потенциала митохондрий к 100 мкл клеточной суспензии (2–3×10⁶ клеток/мл) добавляли 20-кратный рабочий раствор DiOC₆(3) («Invitrogen», США), получая конечную концентрацию красителя, равную 20 нМ [15]. Рабочий раствор готовили *ex tempore*, добавляя к 10 мкл стокового раствора (стоковый – 1 мг/мл ДМСО (диметилсульфоксид), дозировали по 10 мкл и хранили при –20°C до использования) 4900 мкл ЗФР. После внесения красителя образцы тщательно перемешивали и инкубировали в течение 20 мин при 37°C в атмосфере 5% CO₂ в защищенном от света месте. По завершении инкубации образцы отмывали избытком ЗФР, содержащим 2% ЭТС (8 мин при 300g), после чего надсадок удаляли, а клеточный осадок переводили в 100 мкл свежего ЗФР. В полученную клеточную суспензию вносили 10 мкл раствора йодистого пропидия («Sigma-Aldrich», США), получая финальную концентрацию PI, равную 1 мкг/мл, после чего образцы инкубировали в течение 10 мин при комнатной температуре в защищенном от света месте. По завершении инкубации в образцы вносили по 200 мкл ЗФР и проводили цитометрический учет. Для каждого из образцов анализировали не менее 50000 одиночных клеток. Чтобы отличить одиночные клетки от слипшихся (агрегатов) и затем дискриминировать агрегаты из анализа, использовали следующие сочетания сигналов по прямому (величина, пропорциональная размеру клеток) и боковому (величина, характеризующая структуру клеток) светорассеянию: интенсивность пикового против интенсивности интегрального сигналов по FS или SS, а также время полета против интенсивности интегрального сигналов FS или SS. Анализ полученных результатов проводили при помощи программного обеспечения Kaluza™ («Beckman Coulter», США).

Результаты. Для анализа результатов проточной цитофлуориметрии были построены гистограммы интенсивности флуоресценции DiOC₆(3), увеличение интенсивности флуоресценции которого зависит от мембранного потенциала митохондрий. На рис. 2 для каждой из культур клеток, применявшихся в эксперименте, приведено по одному типичному примеру такой гистограммы. Полученные из гистограмм данные были обработаны и сведены в таблице, где в процентном соотношении приведены живые и находящиеся на ранних и поздних стадиях апоптоза клетки.

Из результатов видно, что ни одна из культур клеток вне зависимости от используемой нами мощности облучения не показала статистически достоверного изменения мембранного потенциала и не вызвала изменений в проницаемости мембраны по сравнению с контролем.

Заключение

Таким образом, мы показали, что воздействие широкополосного терагерцового излучения диапазона 0,05–1,2 ТГц мощностью 30; 2; 0,1 мВт как на адгезионные культуры (клетки карциномы легкого человека, клетки аденокарциномы молочной железы, клетки карциномы сигмовидной кишки), так и суспензионные культуры (линия клеток, обладающая свойствами незрелых тучных клеток, клеточная линия лейкоза гистиоцитов человека, клетки промиелоидной лейкемии человека), а также клетки первичных культур (тимоциты и спленоциты мышей линии СВА) не оказывает существенного влияния на изменение функциональной активности митохондрий клеток, равно как и не нарушает целостности их билипидных поверхностных мембран. Однако отсутствие влияние может быть обусловлено тем, что клетки находятся в водной среде, которая имеет большое поглощение в ТГц диапазоне спектра. Однако данное предположение не объясняет отсутствие какого-либо эффекта на клетки адгезионных культур в составе монослоя, прилегающего плотно к поверхности подложки. Исходя из этого, необходимы дополнительные исследования с культурами клеток, варьируя длительность и мощность облучения.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 14.512.11.0020).

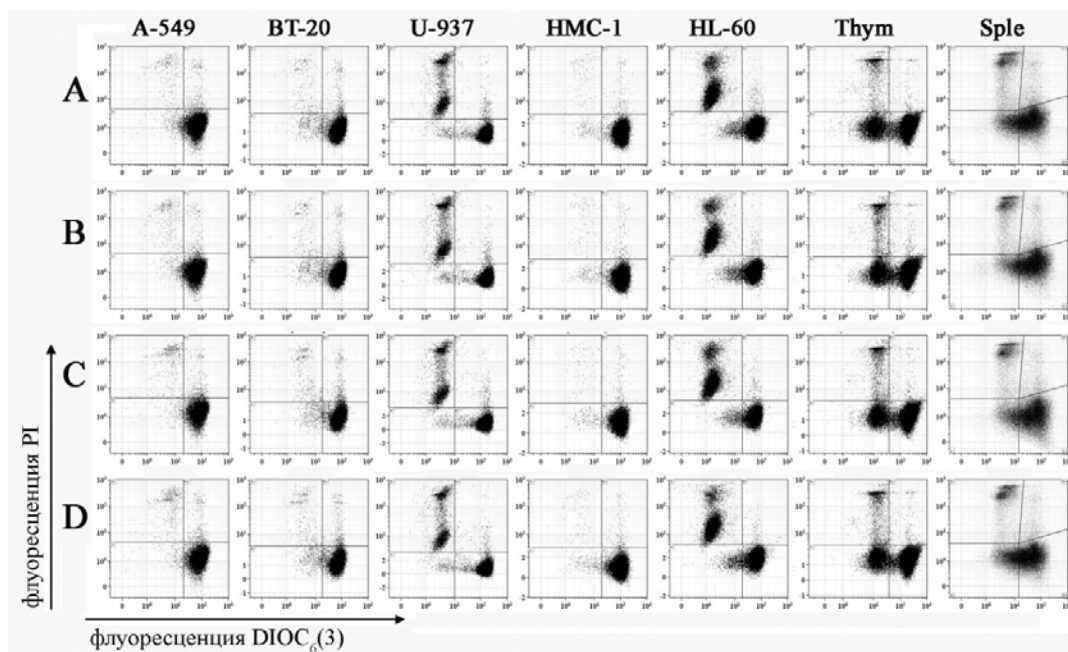


Рис. 2. Исследование мембранного потенциала митохондрий при помощи флуоресцентного красителя DIOC₆(3). По оси абсцисс – интенсивность флуоресценции DIOC₆(3); по оси ординат – интенсивность флуоресценции йодистого пропидия. Слева направо – различные линии клеток. Сверху вниз – примеры гистограмм распределения клеток в контрольных лунках, а также в лунках, облученных излучением с мощностью 0,1; 2 и 30 мкВт (ряды гистограмм А, В, С и D, соответственно)

Культура клеток	Мощность облучения, мкВт	Живые клетки, %	Ранний апоптоз, %	Поздний апоптоз/некроз, %
А-549	Контроль	95,9±0,5	1,2±0,7	2,8±0,3
	0,1	96,2±0,3	1,2±0,4	2,6±0,3
	2	96,3±0,4	0,7±0,2	3,0±0,3
	30	96,4±0,4	0,7±0,2	2,9±0,2
BT-20	Контроль	93,3±0,2	2,6±0,5	4,1±0,4
	0,1	93,1±0,2	2,5±0,4	4,4±0,6
	2	93,3±0,3	2,4±0,5	4,3±0,3
	30	93,2±0,3	2,7±0,5	4,1±0,2
HMC-1	Контроль	97,3±0,4	0,8±0,2	1,9±0,6
	0,1	97,5±0,1	0,9±0,2	1,6±0,2
	2	97,5±0,2	0,8±0,2	1,7±0,4
	30	97,4±0,1	0,8±0,3	1,7±0,2
HL-60	Контроль	65,2±7,7	4,1±1,2	30,7±8,4
	0,1	66,4±7,7	4,3±1,4	29,3±8,7
	2	66,6±8,5	3,9±1,3	29,6±9,5
	30	67,7±7,3	4,0±1,2	28,4±8,1
U-937	Контроль	56,3±8,6	2,4±0,3	41,3±6,5
	0,1	55,9±6,4	2,5±0,3	41,6±6,5
	2	56,4±6,7	2,8±0,3	40,8±6,5
	30	58,1±6,5	2,3±0,3	39,7±6,6
Тимоциты мышь	Контроль	84,1±1,3	11,4±1,3	4,5±0,4
	0,1	83,8±1,4	11,2±1,4	5,0±0,5
	2	83,9±1,2	11,3±1,2	4,8±0,6
	30	84,1±1,3	11,6±1,3	4,3±0,5
Спленциты мышь	Контроль	53,6±0,4	25,5±0,9	20,9±1,0
	0,1	53,5±0,6	26,6±1,1	19,9±0,8
	2	52,2±0,8	26,5±1,0	21,3±0,8
	30	53,6±0,5	26,1±1,0	20,3±0,8

Таблица. Результаты оценки мембранного потенциала митохондрий и целостности поверхностной мембраны клеток при помощи проточной цитометрии (Xs, n≥4 для каждой из культур, для спленцитов и тимоцитов n=8)

Литература

1. Globus T.R., Woolard D.L., Khromova T., Crowe T.W., Bykhovskaia M., Gelmont B.L., Hesler J. and Samuels A.C. THz-spectroscopy of biological molecules // J. Bio. Phys. – 2003. – V. 29. – № 2. – P. 89–100.
2. Цуркан М.В., Собакинская Е.А., Смолянская О.А., Беспалов В.Г., Вакс В.Л., Балбекин Н.С. Исследование спектра молекулы ДНК в терагерцовой области частот // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 1 (77). – С. 15–19.
3. Sun Y., Sy M.Y., Wang Y.X., Ahuja A.T., Zhang Y.T., Pickwell-Macpherson E. A promising diagnostic method: Terahertz pulsed imaging and spectroscopy // World J. Radiol. – 2011. – V. 3. – № 3. – P. 55–65.
4. Федоров В.И. Исследование биологических эффектов электромагнитного излучения субмиллиметровой части терагерцового диапазона // Биомед. радиоэлектроника. – 2011. – № 2. – С. 17–27.
5. Wilmlink G.J., Grundt J.E. Invited review article: current state of research on biological effects of terahertz radiation // J. Infrared Millimeter Terahertz Waves. – 2011. – V. 32. – № 10. – P. 1074–1122.
6. Olshevskaya J.S., Ratushnyak A.S., Petrov A.K., Kozlov A.S., Zapara T.A. Effect of terahertz electromagnetic waves on neurons systems // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, 2008. SIBIRCON 2008; IEEE Region 8 International Conference. – 2008. – P. 210–211.
7. Olshevskaya J.S., Kozlov A.S., Petrov A.K., Zapara T.A., Ratushnyak A.S. Cell membrane permeability under the influence of terahertz (submillimeter) laser radiation // Vestnik Novosibirsk State University. – 2010. – № 5. – № 4. – С. 177–181.
8. Alekseev S.I., Ziskin M.C. Effects of millimeter waves on ionic currents of Lymnaea neurons // Bioelectromagnetics. – 1999. – V. 20. – № 1. – P. 24–33.
9. Gerald J. Wilmlink, Bennett L. Ibey, Caleb L. Roth, Rebecca L. Vincelette, Benjamin D. Rivest, Christopher B. Horn, Joshua Bernhard, Dawnlee Roberson, William P. Roach. Determination of Death Thresholds and Identification of Terahertz (THz)-Specific Gene Expression Signatures // Proc. SPIE. 2010. – V. 7562. – P. 75620K-1–75620K-8.
10. Ramundo Orlando A., Gallerano G.P. Terahertz radiation effects and biological applications // J. Infrared Millimeter and Terahertz Waves. – 2009. – V. 30. – P. 1308–1318.
11. Siegel P.H., Pikov V. Can neurons sense millimeter waves? // SPIE Photonics West, BiOS. – 2010. – P. 7562-17.
12. Siegel P.H., Pikov V. Impact of low intensity millimeter-waves on cell membrane permeability // Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, (2009), IRMMW-THz (2009), 34th International Conference. – 2009. – V. 1. – № 1. – P. 21–25.
13. Cottet-Rousselle C., Ronot X., Lerverve X., Mayol J.F. Cytometric assessment of mitochondria using fluorescent probes // Cytometry A. – 2011. – V. 79. – № 6. – P. 405–425.
14. Wlodkowic D., Telford W., Skommer J., Darzynkiewicz Z. Apoptosis and beyond: cytometry in studies of programmed cell death // Methods Cell Biol. – 2011. – V. 103. – P. 55–98.
15. Castedo M., Ferri K., Roumier T., Metivier D., Zamzami N., Kroemer G. Quantitation of mitochondrial alterations associated with apoptosis // J. Immunol. Methods. – 2002. – V. 265. – № 1–2. – P. 39–47.

- Цуркан Мария Валериевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tsurkan.maria@yandex.ru
- Кудрявцев Игорь Владимирович** – ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, Дальневосточный федеральный университет, Санкт-Петербургский государственный университет; кандидат биологических наук, доцент; igorek1981@yandex.ru
- Серебрякова Мария Константиновна** – Санкт-Петербургский государственный университет, студент, m-sebebyakova@yandex.ru
- Несговорова Юлия Сергеевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, yulyanesgovorova@yandex.ru
- Трулев Андрей Сергеевич** – ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, научный сотрудник, trulioff@gmail.com
- Назарова Инга Валерьевна** – Санкт-Петербургский государственный университет, студент, oblaka12@mail.ru
- Смолянская Ольга Алексеевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, o_smolyanskaya@mail.ru
- Назаров Петр Григорьевич** – ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, зав. лабораторией; Санкт-Петербургский государственный университет; доктор медицинских наук, профессор, peter_nazarov@mail.ru
- Полевщиков Александр Витальевич** – Дальневосточный федеральный университет, зав. кафедрой; ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, вед. научный сотрудник; доктор биологических наук, профессор; Alexpol512@yandex.ru

УДК 612:519.2: 536.75

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНТРОПИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА
ПО ЕГО ФИЗИОЛОГИЧЕСКИМ РИТМАМ**

А.Ф. Иванова

Проиллюстрированы результаты экспериментального измерения электрокардиограммы для различных состояний пациентов. Приведены результаты построения фазовых портретов (аттрактора). Показано, что в зависимости от того, в каком состоянии находится пациент (тяжелом, средней тяжести, удовлетворительном и т.д.), изменяются значения корреляционной размерности и фазовые траектории.

Ключевые слова: энтропия, корреляционная размерность, аттрактор, фрактал.

Введение

Одной из важных научных проблем естествознания является решение задачи предсказания поведения изучаемого объекта во времени и пространстве на основе определенных знаний о его начальном состоянии. Эта задача сводится к нахождению некоторого закона, который позволяет по имеющейся информации об объекте в начальный момент времени t_0 в точке пространства x_0 определить его будущее в любой момент времени $t > t_0$. В зависимости от степени сложности самого объекта этот закон может быть детерминированным или вероятностным, может описывать эволюцию объекта только во времени, только в пространстве, а также пространственно-временную эволюцию [1]. Как известно, в ритме сердца человека содержится информация о процессах, протекающих не только в самом сердце и кровеносной системе, но и в различных звеньях системы управления: нервных сплетениях, железах внутренней секреции и т.д. Исследования показали, что даже в условиях постоянного уровня физической активности человека сердечный ритм не является постоянным, и сердечно-сосудистая система может реализовывать различные режимы колебаний. Исследования динамики состояния человека имеют большое значение для диагностики и прогнозирования различных заболеваний, включая внезапную смерть.

Исследования процессов преобразования энергии в живых организмах начались еще в конце XVIII века с калориметрических опытов Лавуазье и Лапласа по изучению связи между образованием тепла и дыханием (потреблением кислорода) у животных. Активно продолжились эти исследования в середине XX века в связи с практическими проблемами обеспечения теплообмена в скафандрах космонавтов, медицинских барокамерах. Обнаружилось, что при отклонениях от стабильного состояния, т.е. в развивающемся и увядающем организме, как и в зрелом организме, при различных патологиях и болезнях наблюдаются нерегулярные расхождения прямой калориметрии с непрямой (по балансу дыхания) [2]. В термодинамическом отношении эта нерегулярность проявляется прежде всего тем, что отдача теплоты на единицу массы тела в ходе развития организма, его патологий и болезней не остается постоянной – сначала наблюдается резкий подъем или спад кривой потери тепла, а затем ее выравнивание до минимального значения. Последнее соответствует известной в линейной термодинамике открытых систем теореме Пригожина о стремлении прироста энтропии (соответственно, диссипации энергии или скорости выделения теплоты) к минимуму по мере перехода системы в устойчивое состояние со стационарными процессами обмена [3]. На кафедре теплофизики ЛИТМО (80–90-ые годы прошлого века) был создан динамический калориметр-респираториметр. Однако предложенный метод, где физическая энтропия измеряется по тепловыделениям человека, совершенной работе и балансу дыхания, трудно осуществим в условиях, когда пациент находится в критической ситуации, потому что, во-первых, требуется достаточно много времени, чтобы провести измерения, а, во-вторых, необходима полная изоляция организма, что тоже невозможно в критической ситуации. К тому же, динамический калориметр-респираториметр дорог в производстве и эксплуатации и не выпускается серийно. Чтобы избежать вышесказанного, предлагается перейти к рассмотрению не физической, а информационной энтропии [4].

Метод фрактального анализа

Живой организм как открытая неравновесная и необратимая система обнаруживает нерегулярность, приводящую к стохастическим явлениям локальной и общей неустойчивости, связанным уже с нелинейными и даже когерентными синергетическими эффектами. Существенную роль в формировании и проявлении фрактальных свойств играют динамические процессы, в особенности динамический хаос. Он характеризуется внутренними самоподдерживающимися фрактальными флуктуациями – стохастическими «автоколебаниями», по интенсивности и спектральному составу принципиально отличающимися от характеристик внешне зашумленных детерминированных осцилляторов. Этот эффект обнаруживается при анализе различных параметров многих ритмических процессов, отражающих физиологические показатели энергообмена и саморегуляции организма – прежде всего, электрических потенциалов сердечных сокращений [5] и деятельности мозга, а также акустики дыхания, вариаций длительности пауз и силы звука в речи и многих других. Большинство таких ритмов в фазовом представлении характеризуются множеством хаотических траекторий – странным аттрактором [6], который реализуется только в дисси-

пативных системах и обладает дробной (фрактальной) размерностью D . Общим выражением для определения размерности является размерность Реньи [7]

$$D_{Rq} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{m \rightarrow \infty} \left[\frac{\ln I_{Rq}(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \right]. \quad (1)$$

Здесь $I_{Rq} = \frac{\sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i^q}{1 - q}$ – обобщенная энтропия Реньи порядка q ; $M(\varepsilon)$ – минимальное число n -мерных

«измерительных» кубиков с ребром ε , необходимых для покрытия аттрактора в n -мерном фазовом пространстве; m – число точек, используемых для оценки размерности (число последовательных измерений, проводимых через равные промежутки времени τ). Частными случаями соотношений Реньи (1) являются: при $q=1$ – энтропия Шеннона $I_S = -\sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i \ln p_i$ и соответствующая информационная размерность

$$D_{IS} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln I_S(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}; \text{ при } q=2 \text{ – корреляционная энтропия } I_C = \ln \frac{C(r, n)}{C(r, n+1)}$$

и корреляционная размерность $D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{M(\varepsilon)} p_i^2}{\ln \varepsilon} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}$. Здесь $C(\varepsilon) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i,j=1}^m \theta(\varepsilon - \rho(x_i, x_j))}{m^2}$ – корреляционный интеграл; θ – «ступенчатая» функция Хевисайда; ρ – расстояние между точками в n -мерном фазовом пространстве; p_i – вероятность того, что пара точек аттрактора принадлежит i -му кубику;

$C(r) = \sum_{i=0}^{m-2} \sum_{j=i+1}^{m-1} \frac{\theta(r - \rho(x_i, x_j))}{m(m-1)/2}$ – корреляционный интеграл, показывающий относительное число пар точек аттрактора, находящихся на расстоянии, не большем r .

Наряду с этим, есть и другие признаки хаотических колебаний биоэнергетических процессов, обнаруживаемые известными математическими методами анализа временных рядов. В частности, это сплошной спектр мощности (для комплексного сигнала $P(t) = x(t)x^*(t)$) с отрицательным показателем β зависимости спектральной плотности мощности от частоты $E_{xx}(\omega) = |X(\omega)|^2 \sim 1/\omega^{|\beta|}$, где

$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt$ – преобразование Фурье, связывающее друг с другом представления исходного сигнала в виде функций от времени $x=f(t)$ и от частоты $x=f(\omega)$; быстро спадающая во времени автокорреляционная функция $A_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)x(t-\tau) d\tau$, Фурье-образ которой по теореме Винера–Хинчина также определяет спектральную плотность мощности $F[A_{xx}(t)] = E_{xx}(\omega)$. Все это указывает на то, что на фоне общих статистических флуктуаций хаотичность есть жизненно необходимая составляющая нормальной активности организма.

Привлекает то, что сложные медико-биологические структуры и процессы (сигналы) могут быть численно охарактеризованы всего лишь одним параметром (показателем фрактальной размерности). Также такие сложные объекты могут быть описаны математическими моделями с простыми свойствами, реконструируемыми по поведению параметров реальной системы. Примечательно, что изменение значения фрактальной размерности оказывается одним из наиболее ранних симптомов различных патологий, а надежность такой фрактальной диагностики может быть выше, чем у классических методов исследования функционального состояния. Если при этом использовать обобщенный (интегральный) показатель деятельности организма, определяющий его общую жизнеспособность и устойчивость, то можно не только диагностировать, но и прогнозировать динамику развития изменений функционального состояния человека.

Привлекает то, что сложные медико-биологические структуры и процессы (сигналы) могут быть численно охарактеризованы всего лишь одним параметром (показателем фрактальной размерности). Также такие сложные объекты могут быть описаны математическими моделями с простыми свойствами, реконструируемыми по поведению параметров реальной системы. Примечательно, что изменение значения фрактальной размерности оказывается одним из наиболее ранних симптомов различных патологий, а надежность такой фрактальной диагностики может быть выше, чем у классических методов исследования функционального состояния. Если при этом использовать обобщенный (интегральный) показатель деятельности организма, определяющий его общую жизнеспособность и устойчивость, то можно не только диагностировать, но и прогнозировать динамику развития изменений функционального состояния человека.

Результаты исследований физиологического состояния организма человека по энтропийно-фрактальным показателям

Практически в качестве входных диагностических показателей (сигналов) деятельности организма, отражающих его общую жизнеспособность, наиболее удобно использовать электрические сигналы работы сердца, которые достаточно просто регистрируются, так как имеют высокую амплитуду и четко выраженные характерные точки ритма. Динамический тренд размерности аттрактора объективно отражает изменение функционального состояния организма в устойчивых, переходных и критических состояниях, давая количественную оценку динамики и прогноз этих изменений при любом воздействии на человека (возрастные изменения, патологии, болезни, физические нагрузки, профессиональная деятельность, психологический стресс и т.п.) и предупреждая развитие опасной ситуации. Определение предела при ограниченной последовательности измерений осуществляется на основе теоремы Такенса [8]. В соответствии с ней восстановление (реконструкция) фазового портрета динамической системы не требует знания временных зависимостей всех координат состояния, а может осуществляться по скалярному вре-

менному ряду, если в качестве недостающих координат вектора состояний используется тот же самый ряд, взятый с некоторым запаздыванием $x_n = f(t + (n-1)\tau)$. Оптимальная величина запаздывания τ выбирается равной времени первого пересечения нуля автокорреляционной функции.

С помощью кардиографа «Холтер» (с частотой 500 Гц) были получены электрокардиограммы (ЭКГ) пятнадцати пациентов различного возраста и пола, которым проводились хирургические операции в стационаре. Снятие ЭКГ велось примерно в течение одних суток, таким образом, была возможность наблюдать за всеми физиологическими изменениями, происходящими в организме за период подготовки к операции, собственно анестезии и времени послеоперационной реабилитации. Затем в программе «Валента +» проводилась расшифровка сигнала. Далее с помощью программы «Фрактан» для пациента был проведен расчет корреляционной размерности для каждой минуты всего периода снятия кардиограммы. На основе рассчитанных значений был построен динамический тренд. Кроме того, в вычислительном пакете MATLAB была написана программа, строящая странные аттракторы на основе массива данных в двумерном и трехмерном фазовых пространствах. Временные ряды для построения аттрактора были получены по теореме Такенса методом задержки последовательно на величину τ .

Исследования проводились для ограниченного (трехмерного) фазового пространства, так как из рис. 1 видно, что тренд корреляционной размерности по форме имеет один и тот же вид как для неограниченного, так и для ограниченного (3-мерного и 7-мерного) фазового пространства [9].

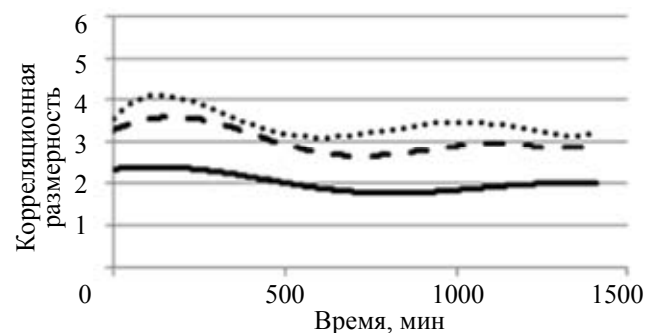


Рис. 1. Тренд корреляционной размерности для ограниченного 3-мерного (—), 7-мерного (- - -) и неограниченного (.....) фазового пространства

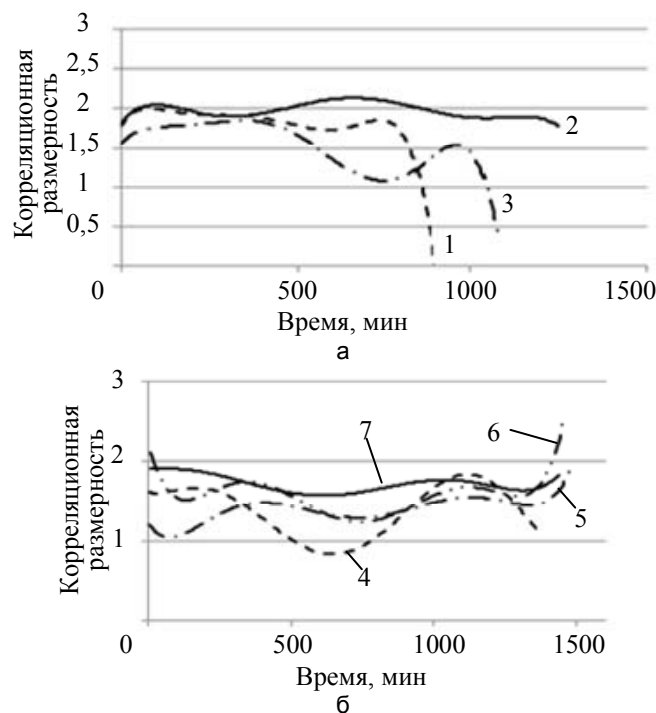


Рис. 2. Тренд корреляционной размерности для пациентов в тяжелом состоянии (пациенты 1, 2, и 3) (а) и под наркозом (пациенты 4, 5, 6 и 7) (б)

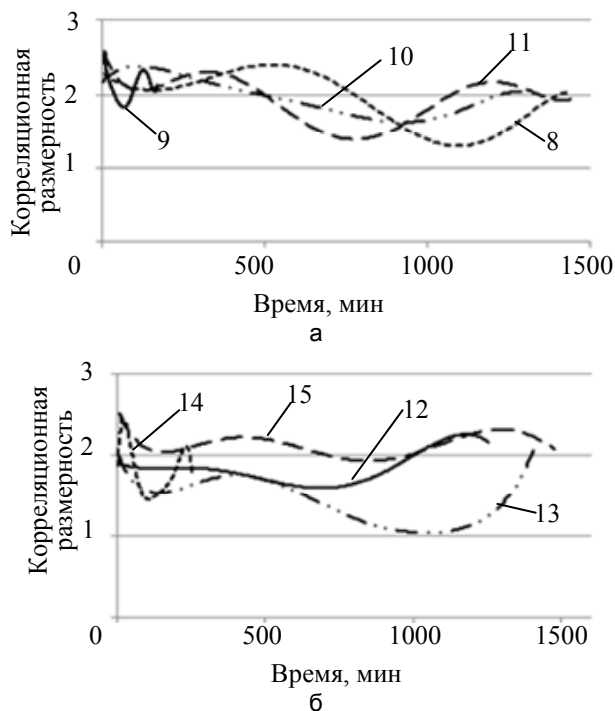


Рис. 3. Тренд корреляционной размерности для пациентов в состоянии средней тяжести (пациенты 8, 9, 10 и 11) (а) и в удовлетворительном состоянии (пациенты 12, 13, 14 и 15) (б)

Для 15 человек были построены тренды корреляционной размерности (рис. 2, 3) и построены аттракторы на основе массива данных. На рисунках пациенты обозначены числами 1, 2, 3...15.

Отдельного внимания заслуживают фрактальные анализы 4 пациентов:

- «Пациент 15» (здоровый) (рис. 4);
- «Пациент 1» (летальный исход) (рис. 5);
- «Пациент 3» (нарушение ритма сердца с угрозой для жизни) (рис. 6);
- «Пациент 2» (вегетативное состояние) (рис. 7).

Была выявлена следующая закономерность. Для пациентов в тяжелом состоянии (рис. 5, в; рис. 6, а; рис. 7, а) характерна размерность «0» или близкая к целому числу (в приведенном примере для «Пациента 2» эта размерность близка к числу 2), что соответствует зоне риска (странные аттракторы как образы динамического хаоса в фазовом пространстве системы имеют в общем случае дробную (нецелую) размерность). Появление значений корреляционной размерности, равных 0, свидетельствует о том, что фазовая траектория стремится к точке. Из рис. 5, а, б; рис. 6, б; рис. 7, б, видно, что аттрактор системы стремится к предельному циклу или является таковым. Для всех пациентов, находящихся в удовлетворительном состоянии, были получены нецелые значения корреляционной размерности, которые не колебались в районе целого числа (рис. 3, б; рис. 4, а), что говорит о том, что мы имеем дело с хаотическим аттрактором. Это подтверждено и построенными аттракторами для данных пациентов (рис. 4, б).

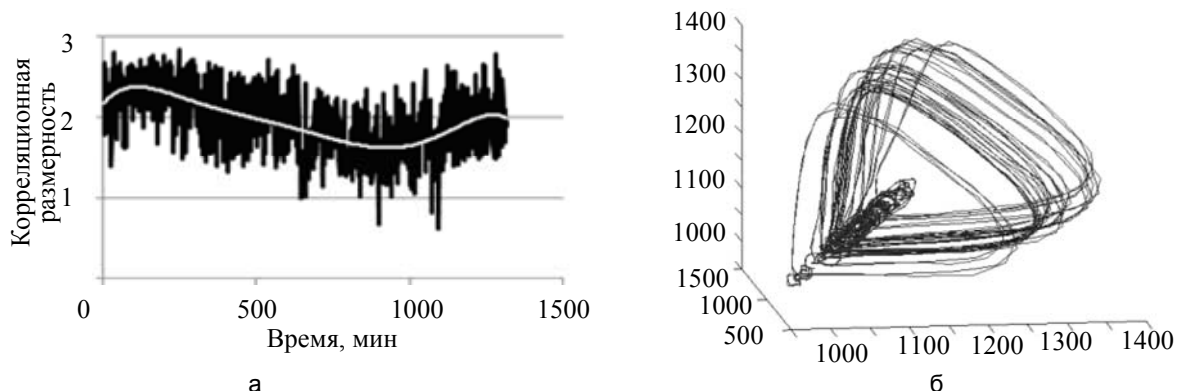


Рис. 4. «Пациент 15»: тренд корреляционной размерности (а) и фазовая траектория (б)

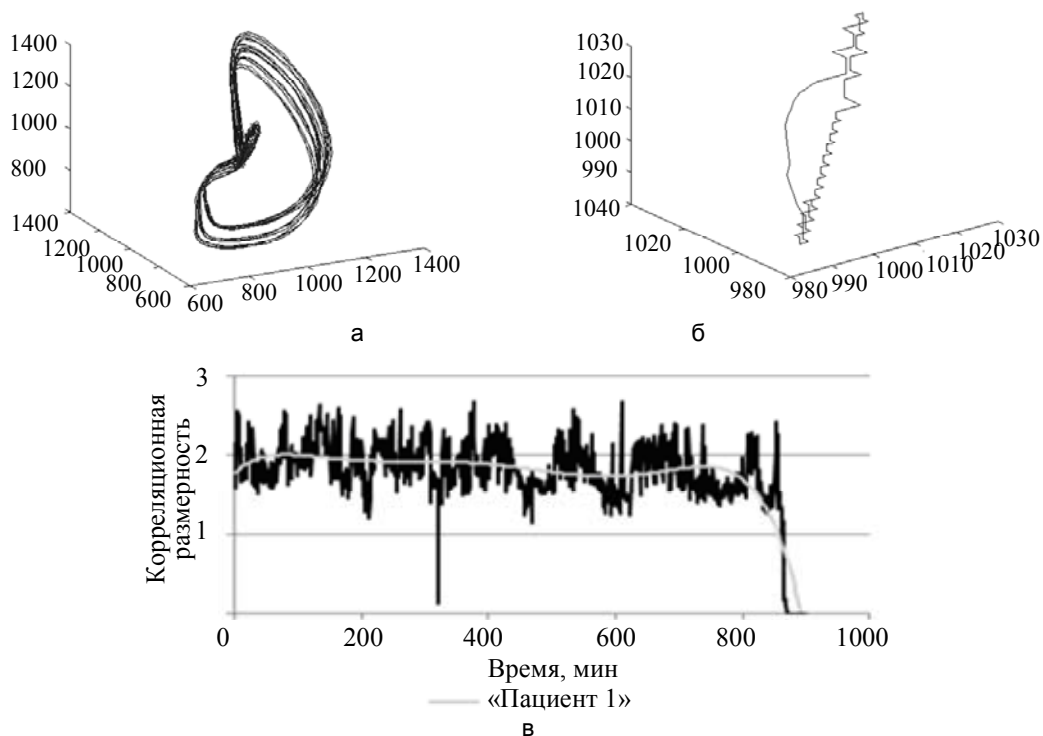


Рис. 5. «Пациент 1»: фазовая траектория на 700 мин (а) и на 1008 мин (б); тренд корреляционной размерности (в)

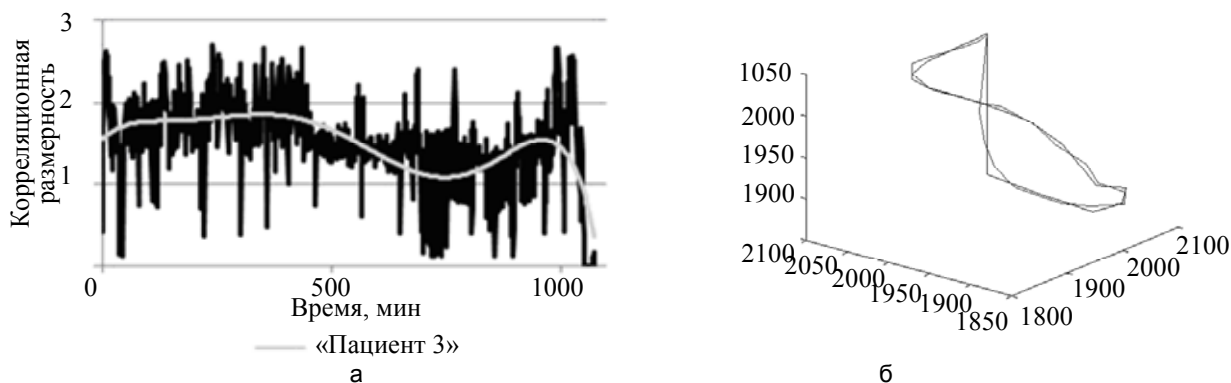


Рис. 6. «Пациент 3»: тренд корреляционной размерности (а) и фазовая траектория на 1075-ой мин (б)

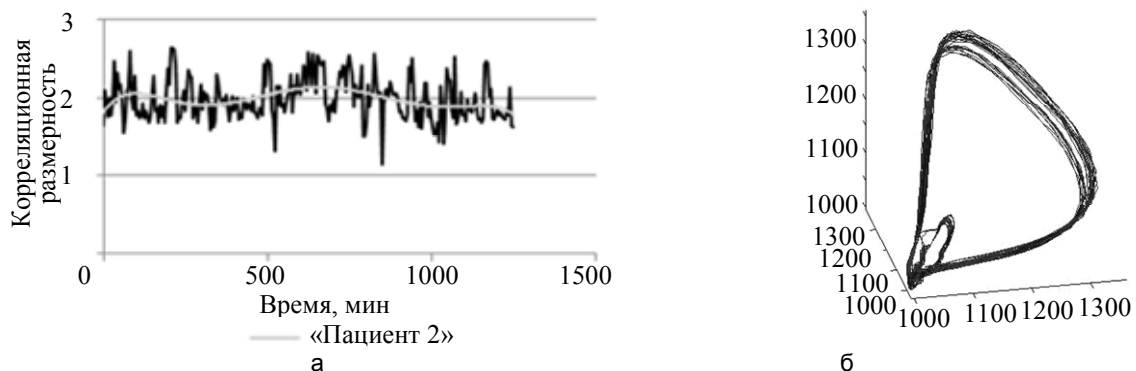


Рис. 7. «Пациент 2»: тренд корреляционной размерности (а) и фазовая траектория на 1000 мин (б)

Заключение

В исследовании были построены тренды корреляционной размерности для пациентов находящихся в различных состояниях. По полученным данным проведен анализ динамики состояния пациентов с тяжелым, средним, удовлетворительным состоянием и при общей анестезии, с целью диагностирования и прогнозирования (на короткий промежуток времени) состояния пациентов.

Определение информационной энтропии на основе анализа временной последовательности периодических сигналов организма любой природы (электрических, механических, тепловых и других), отражающих его общую жизнеспособность, реализуется средствами, связанными с разработкой программно-математического обеспечения для существующего в медицинских стационарах измерительного оборудования и имеющихся вычислительных средств [10]. Создание мобильного амбулаторного варианта сопряжено с разработкой новых электронных устройств для сбора, передачи и обработки телеметрической информации, например, по типу аппаратов мобильной связи.

Литература

1. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой. – М.: ЛКИ, 2007. – 224 с.
2. Глазер Р. Биология в новом свете. – М.: Мир, 1978. – 173 с.
3. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир, 2002. – 464 с.
4. Дульнев Г.Н., Стражмейстер И.Б. Способ оценки степени хаотичности энергоинформационных потоков в сознании человека // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – № 2 (18). – С. 59–62.
5. Жаринов И.О., Жаринов О.О. Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 85–147.
6. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. и др. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах / Под ред. В.С. Анищенко. – Москва-Ижевск: Изд-во инст-та. компьютер. исследований, 2003. – 144 с.
7. Mandelbrot B.B. Fractals: Form, Change, and Dimension. – San Francisco. «Freeman», 1977. – 248 с.
8. Antonov V., Fedulin A., Nosyrev S., Kovalenko A. Critical Condition in Human // The Entropy Based Technology of Definition -International Journal Communications in Dependability and Quality Management (CDQM). – 2007. – V. 10. – № 1. – P. 18.
9. Takens F. Dynamical Systems and Turbulence. Lecture. Notes in Mathematics. – Berlin: Springer-Verlag, 1981. – 898 p.
10. Носырев С.П., Коваленко А.Н., Григорьев В.А. Синергетический подход к диагностике критических состояний человека // Медицина экстремальных ситуаций. – 1999. – № 3. – С. 72–74.

Иванова Альмира Фаатъевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Ahbka.gav@mail.ru

УДК 53.083.92

НЕЛИНЕЙНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЦЕССОВ ДЫХАНИЯ И СЕРДЦЕБИЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ПРОВЕДЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Г.Н. Лукьянов, С.А. Полищук

Представлена нелинейная динамическая модель на основе алгоритма метода Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs (NARMAX), дающая связь результатов измерений температурных колебаний воздуха выдыхаемого – выдыхаемого человеком и его кардиограммы. Эта модель фиксирует характерные особенности процессов дыхания человека и его сердцебиения при синхронном измерении, демонстрирует соотношение вдоха и выдоха с сердечным циклом. Показано применение этой модели как для отдельного описания процессов дыхания и сердцебиения, так и во взаимосвязи; предложено использовать ее как для сжатого общего описания особенностей функционирования человеческого организма, так и для описания особенностей конкретного человека. Использование фильтрации совмещенной модели дыхания и сердцебиения по данному методу позволяет разложить полученную модель на независимые исходные модели.

Ключевые слова: нелинейное динамическое моделирование, NARMAX, результаты температурных измерений, кардиограмма, синхронизация.

Введение

Показано, что существует синхронизация процессов дыхания и сердцебиения, которая зависит от состояния человека (покой, физическая нагрузка) и состояния его здоровья [1]. Математическая модель процессов, протекающих в человеческом организме, может быть получена как на основе физических представлений, так и статистическими методами, опирающимися на результаты экспериментальных данных, исследуемых процессов. Описание процессов, изменяющихся во времени, а именно, динамических процессов, осуществляется при помощи динамического моделирования, т.е. в этом случае идет построение динамических моделей. Такие модели могут быть использованы для описания индивидуальных особенностей процессов, которые протекают в организме конкретного человека. Это помогает проводить

исследование особенностей функционирования систем его организма, что существенно облегчает мониторинг состояния здоровья человека.

Для построения динамических моделей можно применять, например, метод ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs), реализованный в пакете MATLAB. Однако процедура ARMAX строит только линейные модели и ее целевая функция линейна по управляющим переменным. Для устранения этих недостатков разработана нелинейная модель на основе метода NARMAX (Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogeneous Inputs) [2], которая обладает следующими достоинствами:

- модели NARMAX подходят для описания обширной области нелинейного динамического поведения процессов;
- модели NARMAX удобны для описания реальных процессов, которыми, в частности, являются процессы дыхания [3] и сердцебиения [1] у человека.

Целью настоящей работы является апробация применения метода NARMAX для построения моделей процессов дыхания и сердцебиения, которые получены на основе проведенных синхронных измерений, а также построение общей модели процессов дыхания и сердцебиения. Для этого нужно решить задачу нелинейного динамического моделирования на основе экспериментально зарегистрированных рядов наблюдений информационных процессов. Информацией для построения нелинейной динамической модели NARMAX служат результаты синхронных измерений колебаний температуры воздуха на входе в нос человека и кардиопотенциала, что позволяет построить общую модель для двух входов и говорит о научной новизне данной работы.

В работе впервые продемонстрировано применение метода NARMAX для построения моделей процессов, которые протекают в организме человека. Метод NARMAX, используя ортогонализацию, позволяет в сжатой форме хранить данные об обследованиях пациентов, на основе которых можно восстановить сведения о предыдущем состоянии здоровья пациента, сравнивая его с проводимым обследованием в данный момент. Также метод NARMAX может быть применен в качестве цифрового фильтра, т.е. применение данного метода для нелинейного динамического моделирования информационных процессов (дыхание и сердцебиение) дает возможность отфильтровывать шумы, имеющиеся в процессах.

В работе проведено исследование модели с двумя входами (дыхание, сердцебиение). В экспериментах использовался прибор [3, 4], не искажающий естественное дыхание человека. Этот прибор был многократно испытан на больных и здоровых людях в лечебных учреждениях Санкт-Петербурга.

Общая модель дыхания и сердцебиения, построенная при помощи метода NARMAX, позволяет исследовать взаимосвязь указанных процессов.

Описание проблемы

Известно, что процессы, протекающие в природе, в большинстве случаев являются периодическими, нелинейными и динамическими [5–8]. Процесс теплообмена при дыхании человека и процесс сердцебиения у человека также являются периодическими, нелинейными и динамическими, о чем, в частности, на примере процесса теплообмена при дыхании (рис. 1, а) говорит его фазовая траектория (рис. 1, б), так как она обладает явными характеристиками нелинейной диссипативной системы.

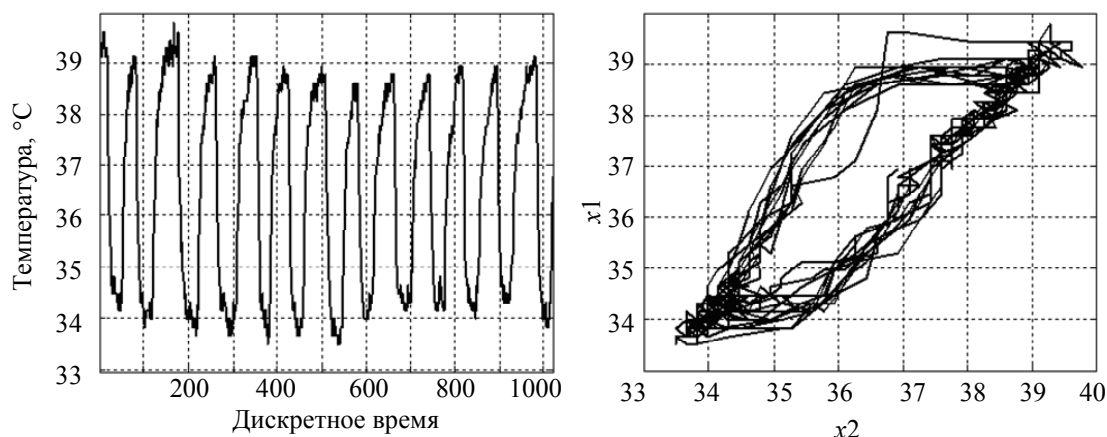


Рис. 1. Изображение процесса (а); фазовая траектория процесса (б): x_1 – процесс, x_2 – сдвиг по фазе x_1

Для адекватного математического описания таких процессов нелинейная динамическая модель должна обладать теми же характеристиками нелинейной диссипативной системы, что и сам процесс. Иначе говоря, процесс и его модель должны иметь близкие по значению корреляционную размерность D_2 и корреляционную энтропию K_2 .

Решение проблемы

Была использована модель NARMAX, т.е. нелинейная авторегрессивная модель скользящего математического ожидания с внешними входами [2]. Она представляет собой полиномиальное выражение, состоящее из последовательности многочленов. Численные коэффициенты одночленов, входящих в состав многочленов данной последовательности, являются элементами матрицы коэффициентов, которая встраивается в эту последовательность, оканчивая итерационный процесс построения модели. Это видно из представленного далее сопоставления результатов измерений процесса теплообмена при дыхании человека и расчета по модели.

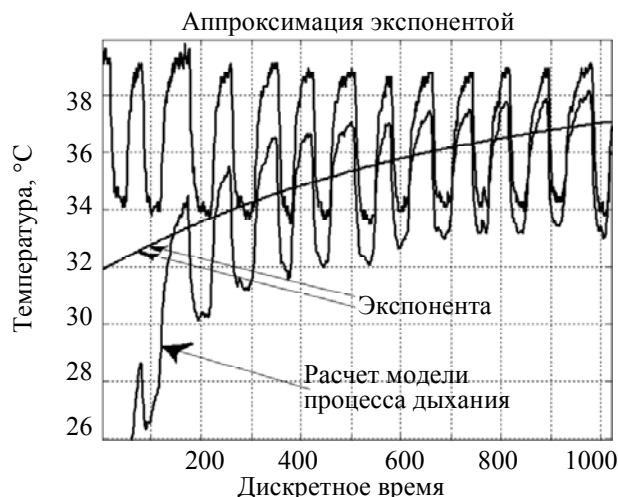


Рис. 2. Реакция модели на процесс. Верхняя кривая – значения температуры вдыхаемого–выдыхаемого воздуха на входе в ноздри; нижняя – модель на этапе подстройки под процесс дыхания

Модель ведет себя как реальный физический прибор, подстраиваясь под описываемый процесс по экспоненте, что показано на рис. 2. Это было выявлено в ходе проведенного исследования возможностей данной модели. Также модель может быть использована в качестве цифрового фильтра, который может очищать входной сигнал от нежелательных помех и ненужных для исследования частот. Сейчас разрабатывается математический аппарат для адаптивной настройки этого фильтра. Метод NARMAX адекватно описывает исследуемый процесс, так как корреляционная размерность процесса с рис. 1, а, $D_2=1,186$, для его модели с рис. 2 $D_2=1,204$. Корреляционная энтропия процесса $K_2=6,142$, а для модели $K_2=6,201$. Близость представленных значений корреляционных размерностей процесса и модели, а также энтропии говорит об адекватности описания исследуемых процессов методом NARMAX. Соответственно, этот метод можно использовать для построения общей модели дыхания и сердцебиения.

Для моделирования общей модели дыхания и сердцебиения были использованы данные, полученные путем измерения температуры на входе в ноздрю с одновременным синхронным измерением параметров сердцебиения.

Если рассматривать потоки данных, которые подаются на входы в модель как совокупность векторов равной длины, то данные векторы можно объединить в одну матрицу, которая удобно может быть представлена в виде таблицы данных. Использование такой таблицы существенно сокращает время на построение модели с несколькими входами.

На рис. 3 показана блок-схема, где наглядным образом представлено построение общей модели дыхания и сердцебиения.

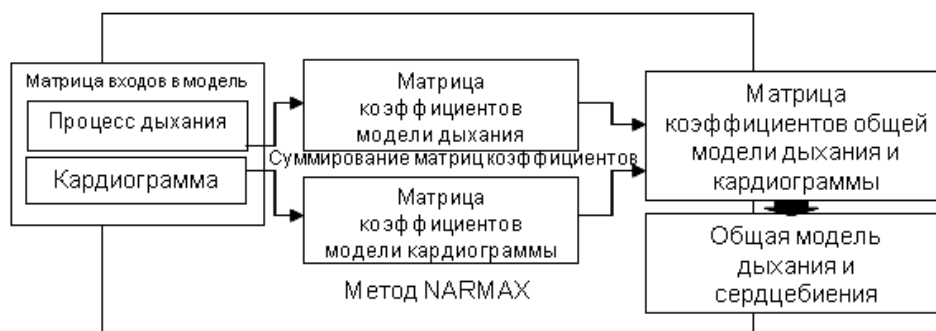


Рис. 3. Наглядная демонстрация построения общей модели дыхания и сердцебиения

Аналитически данную блок-схему можно представить на примере работы с полиномиальными выражениями, состоящих из последовательностей многочленов, которые являются математическим представлением моделей дыхания и сердцебиения. Метод NARMAX, используя процедуру ортогонализации, позволяет произвольно менять степень этих многочленов. Эта особенность данного метода использована для фиксирования всех зубцов исследуемых процессов, повышая чувствительность модели. При этом на каждой итерации действия метода NARMAX не только идет подбор степени многочлена, но и проверяются коэффициенты на значимость вклада в модель. Не значимые коэффициенты метод NARMAX отбрасывает – одночлены с данными коэффициентами в составе многочленов умножаются на ноль. В ходе многочисленных экспериментов по применению метода NARMAX для построения моделей указанных в работе процессов выявлено, что процедура ортогонализации останавливает процесс выбора степени многочлена на шести. Построенные модели имеют следующий вид:

– модель дыхания

$$y1(t) = \sum_{i=0}^n a_i (t - \tau)^i, \quad (1)$$

где (a_0, a_1, \dots, a_n) – столбцы матрицы коэффициентов модели дыхания, t – дискретное время, τ – временная задержка, в данном случае равная нулю, $n=6$;

– модель сердцебиения или кардиограммы

$$y2(t) = \sum_{i=0}^n b_i (t - \tau)^i, \quad (2)$$

где (b_0, b_1, \dots, b_n) – столбцы матрицы коэффициентов модели сердцебиения или кардиограммы, $n=6$.

– общая модель дыхания и сердцебиения

$$y(t) = \sum_{i=0}^n (a_i + k * b_i) (t - \tau)^i, \quad (3)$$

где k – специальный множитель, при изменении которого идет настройка общей модели, $n=6$.

Столбцы матрицы коэффициентов модели дыхания (a_0, a_1, \dots, a_n) (1) в общей модели (3) влияют на поведение общей модели, которое становится сходным с моделью дыхания. Столбцы матрицы коэффициентов модели сердцебиения или кардиограммы (b_0, b_1, \dots, b_n) (2) оказывают влияние на проявление характерных особенностей модели сердцебиения (кардиограммы), т.е. *QRS*-зубцов, характеризующих сокращения желудочков сердца: *Q* – это первый направленный вниз зубец желудочкового комплекса; *R* – любой положительный зубец комплекса *QRS*, следующий за зубцом *Q*; *S* – любой следующий за зубцом *R* отрицательный зубец комплекса *QRS*. Такие обозначения для кардиограммы ввел голландский врач и электрофизиолог Виллем Эйнтховен.

Столбцы матрицы коэффициентов модели дыхания (a_0, a_1, \dots, a_n) , а также столбцы матрицы коэффициентов модели сердцебиения (кардиограммы) (b_0, b_1, \dots, b_n) представляют собой числовые ряды. Пределы последовательностей этих числовых рядов являются основными результатами действия метода NARMAX. Такие результаты позволяют существенно облегчить исследование процессов теплообмена при дыхании и процесса сердцебиения. Таким образом пределы данных числовых рядов могут хранить информацию обо всей модели, что позволяет по одному аналитическому выражению, такому как (1), (2) или (3), проводить экспресс-анализ состояния дыхания человека и его сердцебиения, а также их взаимосвязи. На основе этих численно-аналитических выражений можно создать базу данных, где бы хранилась информация о состоянии здоровья как отдельных респондентов, так и исследуемых групп, что может существенно облегчить ход исследования физиологических процессов человека.

На рис. 4 представлены модели дыхания и сердцебиения, а на рис. 5 – их общая модель в виде графиков. В этом случае сердцебиение снималось по схеме стандартного биполярного отведения I типа, если следовать Эйнтховену. На графиках (рис. 4, б, г) на оси ординат отложено значение кардиопотенциала. В данном исследовании численное значение кардиопотенциала не рассматривается, поэтому на рис. 4, б, г, оно не обозначается. В этой работе представляет интерес только графическое представление кардиопотенциала.

Общая модель дыхания и сердцебиения представлена на рис. 5, а. Она выражена графической зависимостью, поэтому на оси ординат численные значения графика общей модели не отображаются. Эта модель отражает характерные особенности процессов дыхания человека и сердцебиения при их синхронном измерении. При этом поведение модели фиксирует температурные колебания на вдохе и выдохе процесса дыхания (рис. 4, а, в, и рис. 5, б), а также включает особенности сердцебиения, а именно, *QRS*-зубцы (характерные пики – рис. 4, б, г), свойственные сердцебиению. Другими словами, модель показывает соотношение взаимодействия вдоха и выдоха человека с сердечным ритмом. Исходя из представленного, общая модель содержит информацию как о поведении процесса дыхания и процесса сердцебиения. Метод NARMAX также может быть использован в качестве цифрового фильтра для решения задачи нахождения независимых моделей дыхания и сердцебиения из их совмещенной модели. Такая фильтрация может быть реализована при помощи изменения ее параметров.

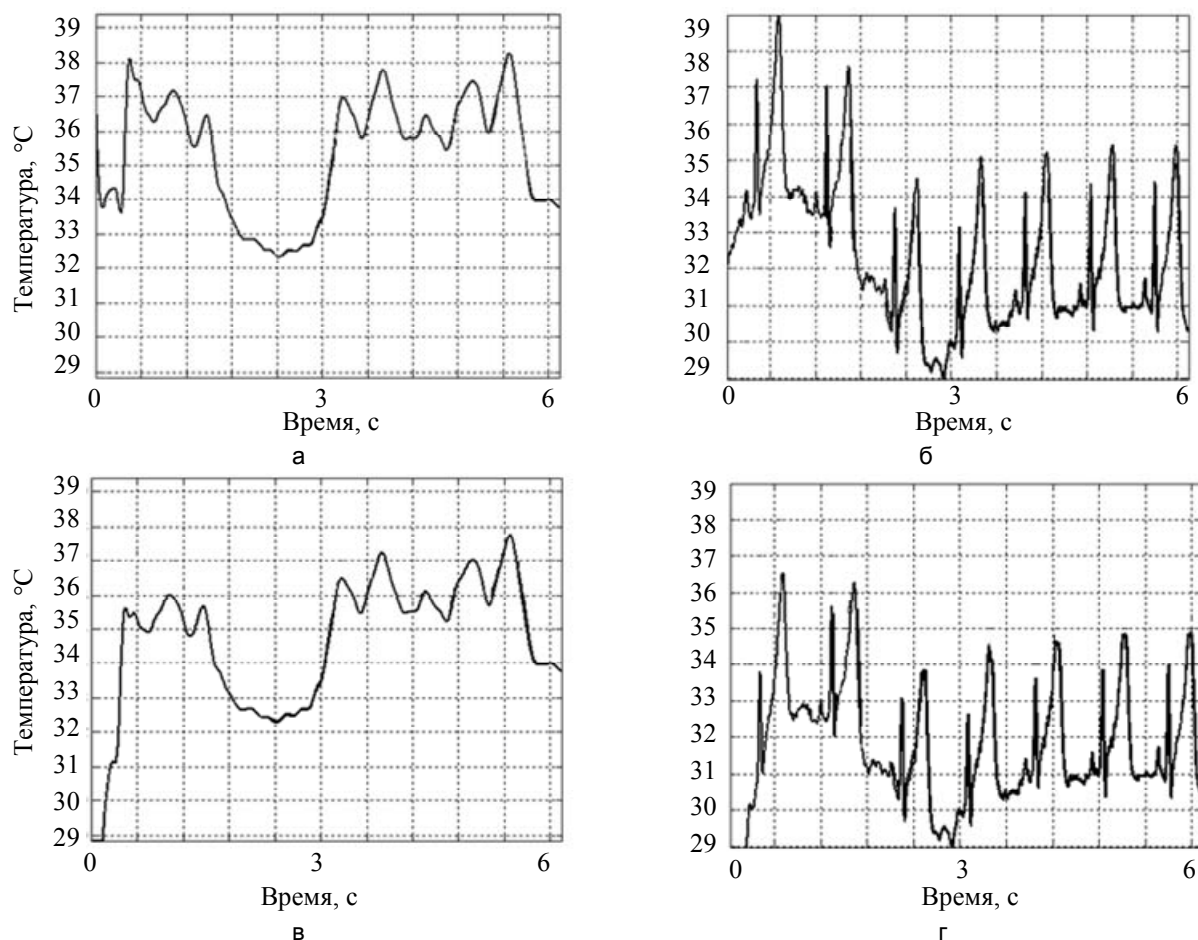


Рис. 4. Процесс теплообмена при дыхании (а) и его модель (в), сердцебиение (б) и его модель (г)

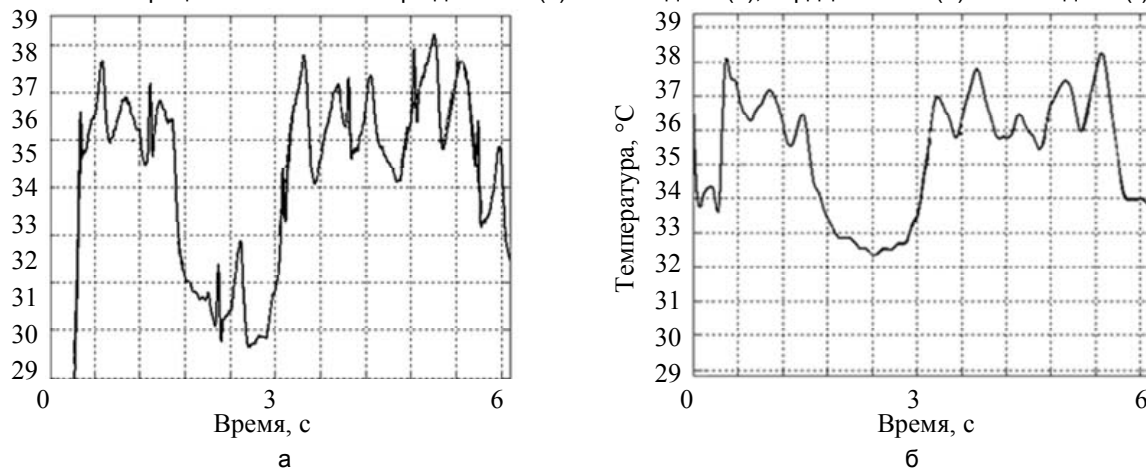


Рис. 5. Общая модель дыхания и сердцебиения (а), процесс теплообмена при дыхании (б)

Практические результаты

В процессе проведения исследования были получены следующие результаты.

- Ортогонализация метода NARMAX дает возможность хранить данные об обследованиях пациентов в сжатой форме, что позволяет быстро получить сведения о предыдущих исследованиях состояния здоровья пациента для сравнения их с проводимым в данный момент обследованием.
- Метод NARMAX пригоден для использования в качестве цифрового фильтра. Применение метода для нелинейного динамического моделирования информационных процессов (дыхание и сердцебиение) обосновано его способностью отфильтровывать шумы, имеющиеся в процессах.
- Общая модель дыхания и сердцебиения, построенная методом NARMAX, применима в области исследования взаимосвязи указанных процессов.

Заключение

Проведено исследование возможностей применения метода NARMAX для построения модели с несколькими входами. На основе метода NARMAX создана статистическая динамическая модель, описывающая как процессы дыхания и сердцебиения в отдельности и во взаимосвязи. Метод NARMAX адекватно описывает исследуемые процессы и может быть применен для построения моделей разной природы.

Метод NARMAX также позволяет использовать фильтрацию совместной модели дыхания и сердцебиения для разложения ее на независимые исходные модели, т.е. данный метод может быть применен в качестве цифрового фильтра. Это позволяет его применять как для сжатого общего описания особенностей функционирования человеческого организма, так и для описания особенностей данного конкретного человека, вне зависимости от местонахождения респондента.

Литература

1. Лукьянов Г.Н., Воронин А.А. Экспериментальные исследования взаимодействия процессов дыхания и сердцебиения // Биотехносфера. – 2011. – № 5–6. – С. 18–22.
2. Billings S.A. Orthogonal least squares methods and their application to non-linear system identification // Int. J. Control. – 1989. – V. 50. – № 5. – P. 1873–1896.
3. Лукьянов Г.Н., Рассадина А.А., Дранишников О.А., Скирмант Е.В., Усачев В.И. Исследование тепло- и массообменных характеристик человеческого дыхания // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 5. – С. 63–66.
4. Воронин А.А., Дмитриев И.А., Рыбина Л.А. Измерительный комплекс для исследования колебательных процессов в человеческом организме // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 4. – С. 18–22.
5. Колюбин С.А., Ефимов Д.В., Никифоров В.О., Бобцов А.А. Управление нелинейными системами на основе гибридных моделей с адаптацией // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 64–68.
6. Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А. Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 44–47.
7. Миронов В.И., Миронов Ю.В., Юсупов Р.М. Регуляризация вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 1. – С. 5–9.
8. Никитин Ю.А. Математическая модель формирования колебаний с использованием методов пассивного цифрового синтеза // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 52–58.

Лукьянов Геннадий Николаевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, genlukjanow@yandex.ru
Полищук Сергей Александрович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Gersey@yandex.ru

УДК 535.14, 57.043

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАРКЕРЫ РАННЕЙ АКТИВАЦИИ ЛИМФОЦИТОВ

М.В. Цуркан, И.В. Кудрявцев, М.К. Серебрякова, А.С. Трулёв, А. М. Снегова, О.А. Смолянская, А.В. Полевщиков, Н.С. Балбекин

В литературе имеются данные, свидетельствующие о влиянии терагерцового (ТГц) излучения на элементы крови. Данное исследование посвящено определению уровня поверхностных маркеров клеточной активации лимфоцитов при воздействии широкополосного ТГц излучения диапазона 0,05–1,2 ТГц. В ходе проведенного исследования нами были выбраны два антигена – CD38 и CD69 – увеличение уровня экспрессии таких маркеров позволяет оценить функциональное состояние клеток в условиях культивирования *in vitro*. Полученные данные свидетельствуют, что излучение с плотностью мощности 9,55; 0,63 и 0,03 мкВт/см² в течение 1 минуты не приводит к изменению функциональной активности лимфоцитов.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, медицина, кровь, лимфоциты, маркеры активации.

Введение

В настоящее время в литературе можно найти некоторое количество работ, посвященных изучению влияния терагерцового (ТГц) излучения на функциональную активность клеток крови человека. В разное время объектами исследования выступали эритроциты или тромбоциты [1], лейкоциты [2], равно

как и лимфоциты. В последнем случае основное внимание уделялось роли ТГц излучения различной мощности в регуляции продвижения клеток по клеточному циклу [3, 4], нарушению целостности генетического материала клеток и стабильности ДНК [4, 5]. Вместе с тем, для корректной оценки функционального состояния клеток можно предложить использование несколько другого подхода, основанного на определении уровня поверхностных антигенов, характеризующих функциональное состояние клеток, т.е. маркеров клеточной активации. Спектр активационных маркеров лимфоцитов крайне широк. Их традиционно разделяют на несколько групп в зависимости от времени появления на поверхности лимфоцита после его активации. В ходе проведенного исследования нами были выбраны два антигена – CD38 и CD69, увеличение уровня поверхностной экспрессии которых позволяет оценить функциональное состояние клеток в условиях культивирования *in vitro*.

Молекула CD38 – это трансмембранный белок, который является ферментом, регулирующим концентрацию цитоплазматического кальция – основного посредника в передаче сигнала от поверхностных рецепторов в ядро клетки. Кроме того, данный фермент обладает целым рядом других свойств и может проявлять активность аденозиндифосфатрибозил-циклазы, циклический аденозиндифосфат-рибозил-гидролазы и NAD-гликогидролазы [6]. CD38 играет роль рецептора, модулируя межклеточные взаимодействия, и может участвовать в передаче сигнала из межклеточного пространства в цитоплазму клеток. Данная молекула широко представлена на активированных клетках крови, к числу которых относятся Т-, В-, НК-клетки и некоторые другие типы клеток, причем определение уровня экспрессии данной молекулы имеет важнейшее прогностическое значение при ведении пациентов с различными патологиями [7]. Что же касается второго маркера активации, выбранного для наших исследований, то молекула CD69 относится к интегральным мембраноассоциированным белкам. Считается, что CD69 принимает участие в пролиферации лейкоцитов, так как уровень его экспрессии коррелирует с увеличением уровня пролиферативной активности клеток, вместе с тем, на «покоящихся», т.е. не активированных лимфоцитах (обычно Т- и В-клетках), уровень экспрессии данной молекулы крайне низок [8].

Экспериментальная установка

Эффект генерации ТГц излучения заключается в том, что лазерное излучение фемтосекундной длительности создает свободные носители заряда в поверхности полупроводника, движение которых в магнитном поле генерирует ТГц излучение. Такой принцип называется генерацией на фотопроводящей антенне.

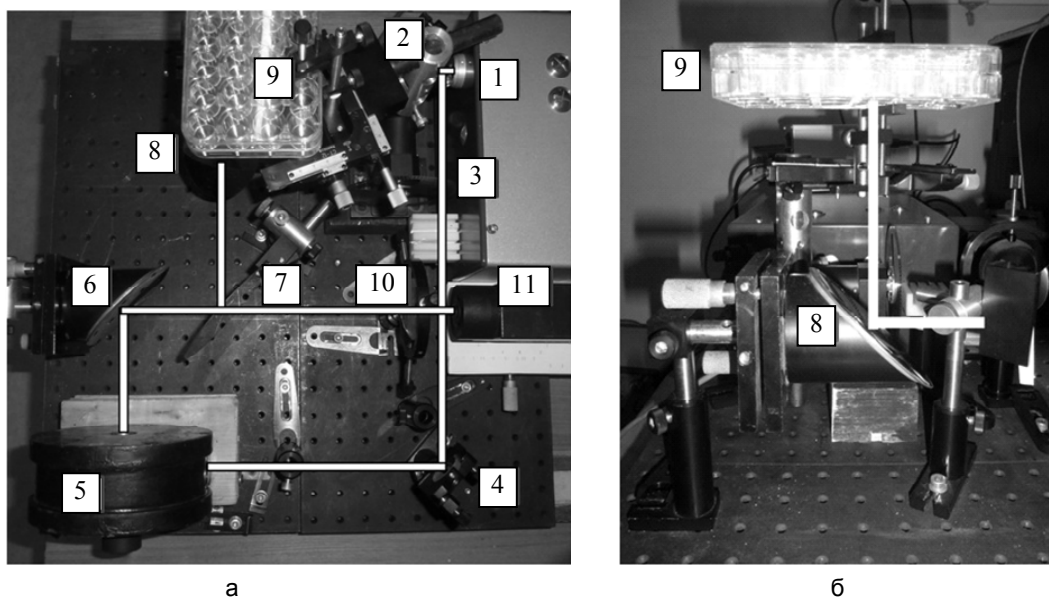


Рисунок. Блок-схема ТГц фотометра: вид сверху (а); элементы 8, 9, вид сбоку (б).

- 1 – фемтосекундный лазер; 2, 4 – зеркала; 3 – механический модулятор; 5 – магнит с размещенным внутри кристаллом InAs (угол падения излучения 45°); 6, 8 – параболические зеркала; 7 – светоделительная кремниевая пластина; 9 – объект, помещенный в ячейку планшета; 10 – линза; 11 – оптико-акустический приемник; 12 – синхронный усилитель; 13 – персональный компьютер

Оптическая схема экспериментальной установки ТГц фотометра с использованием фемтосекундного лазера FL-1 с активной средой Yb:KYW (Femos, Россия; длина волны 1040 нм, длительность импульса 120 фс, частота следования импульсов 75 МГц, средняя мощность 1 Вт) представлена на рисунке. Излучение лазера 1 проходило систему зеркал 2, 4; перед тем, как попасть на полупроводниковый кристалл, оно стробировалось механическим модулятором 3 с частотой 13 Гц, затем наводилось на кристалл

InAs, помещенный в сильное магнитное поле 5. Фемтосекундное излучение, отраженное от кристалла, обрезалось с помощью фильтра из фторопласта. Расходящееся ТГц излучение коллимировалось внеосевым параболическим зеркалом 6 и направлялось на светоделительную кремниевую пластину 7. Далее часть излучения, прошедшая через светоделительную пластину, фокусировалась линзой 10 на оптико-акустический приемник 11 для оперативного слежения за выходной мощностью (ТГц) без прерывания облучения объектов. Другая часть излучения, отраженная от кремниевой пластины, попадала на второе параболическое зеркало 8, которое направляло излучение (сходящийся пучок) вверх на объект 9. Потери ТГц излучения на планшете, в котором находились клетки, составили 20%. Генерируемое ТГц излучение имело полосу частот от 0,05 до 1,2 ТГц. Длительность импульса 2,5 пс. Облучение происходило в течение 1 мин. Площадь облучения составляла 3,14 см². Плотность мощности варьировалась и составляла 9,55; 0,63 и 0,03 мкВт/см². Эксперименты проводились при температуре 20 °С. При каждом уровне мощности облучалось по 1 образцу от каждого донора (18 доноров). 18 контрольных лунок не подвергались облучению.

Материалы и методы

Забор венозной крови клинически здоровых доноров осуществлялся в пробирки с добавлением гепарина (10 ЕД/мл). Кровь смешивалась со стерильным забуференным фосфатами физиологическим раствором (ЗФР) в соотношении 1:2 и наслаивалась на градиент плотности 1,077 г/мл Histopaque-1077 (Sigma-Aldrich, США), после чего центрифугировалась в течение 30 мин при ускорении 400g и температуре 18–22°C. По завершении центрифугирования собирали слой мононуклеарных клеток, образовавшихся на границе раздела фаз. Полученную суспензию клеток дважды отмывали полной культуральной средой (ПКС), приготовленной на основе RPMI-1640 («Биолот», Санкт-Петербург) с добавлением 10% инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки (ЭТС, «Биолот», Санкт-Петербург), 50 мкг/мл гентамицина («Биолот», Санкт-Петербург) и 2 мМ L-глутамина («Биолот», Санкт-Петербург), в течение 7 мин при ускорении 300g. После этого определяли количество полученных клеток при помощи гемоцитометра. Для постановки экспериментов в лунки 24-луночных планшетов («Sarstedt», Германия) вносили по 200 мкл клеточной суспензии (5×10^6 клеток/мл) в ПКС. После облучения к культурам лимфоцитов добавляли по 250 мкл ПКС и инкубировали при 37°C в атмосфере 5% CO₂ в течение 24 ч. По завершении инкубации клетки смешивали с охлажденным ЗФР, содержащим 2% ЭТС, переносили в пробирки для центрифугирования и дважды отмывали избытком ЗФР (300g в течение 8 мин). Полученную суспензию клеток использовали для постановки экспериментов, описанных ниже.

По завершении инкубации суспензию лимфоцитов дважды отмывали избытком ЗФР при описанных выше условиях, после чего смешивали с 100 мкл свежего ЗФР. Для выявления основных популяций клеток использовали следующие антитела: для выявления популяции Т-лимфоцитов – CD3-PC7 (Кат. №737657), для выявления В-лимфоцитов – CD19-ECD (A07770), для выявления популяции натуральных киллеров – CD56-PC5.5 (A79388). В качестве маркеров активации были использованы антитела против CD69 (IM1934U) и CD38 (A07778), меченые PE (фикоэритрин) и ФИТЦ (флуоресцеин изотиоцианат-декстран) соответственно. Для корректного выявления популяции лимфоцитов использовали панлейкоцитарный маркер CD45 (IM2473), меченый APC (алофикоцианин). Окраску антителами против поверхностных антигенов проводили в соответствии с рекомендациями производителя, для оценки уровня экспрессии маркеров активации использовали изотипические контроли. Для каждого из образцов анализировали не менее 20000 лимфоцитов на проточном цитофлуориметре Navios™ («Beckman Coulter», США). Анализ полученных результатов проводили при помощи программного обеспечения Kaluza™ («Beckman Coulter», США).

Результаты и обсуждение

Результат выражали в виде процента клеток, несущих либо один из маркеров активации (CD38+CD69– и CD38–CD69+), либо оба одновременно (CD38+CD69+), либо не несущих ни одного из них (CD38–CD69–). Данные маркеры исследовались на популяциях Т-лимфоцитов (отвечающих за реализации клеточных реакций приобретенного иммунитета), В-лимфоцитов (главной функцией которых является участие в гуморальных реакциях приобретенного иммунитета), а также натуральных киллерах (NK) и НКТ-клетках – популяциях лимфоцитов периферической крови, участвующих в противовирусном и противоопухолевом ответах организма. Обработку полученных результатов проводили с использованием пакета программ PASW Statistics 18 (IBM, США). Результаты сведены в таблицу.

В ходе проведенного исследования нами не было отмечено увеличение уровня поверхностной экспрессии CD38 ни на одном из изученных типов клеток, к числу которых относили Т-, В-, NK- и НКТ-клетки. Вместе с тем, анализ литературы указывает на то, что в условиях культивирования лимфоцитов *in vitro* достоверный прирост уровня CD38 отмечается на лимфоцитах в ответ на внесение таких стандартных иммунологических стимуляторов, как форбол-миристил-ацетат, а также IL-4 и антител против CD3 или поверхностных иммуноглобулинов класса М соответственно [9]. В случае использования ТГц облучения с плотностью мощности 9,55; 0,63; 0,03 мкВт/см² активация ни одной из перечисленных выше

популяций клеток не имела место. Аналогичные результаты были получены и при оценке уровня экспрессии CD69 на основных популяциях лимфоцитов, изменение уровня экспрессии которого может быть связано с пролиферативной активностью лимфоцитов. Как уже отмечалось выше, на неактивированных клетках, особенно Т- и В-лимфоцитах, данная молекула практически отсутствует. Однако при переходе лимфоцитов в активированное состояние на уровне РНК – с использованием полимеразной цепной реакции – достоверное увеличение уровня экспрессии гена CD69 отмечается спустя 3–4 часа после активации клеток в условиях *in vitro* [10]. Именно поэтому CD69 традиционно рассматривается как маркер «ранней» активации лимфоцитов. Что же касается популяций цитотоксических клеток (NK- и NKT-клетки), то уровень экспрессии CD69 на них находится на относительно высоком уровне постоянно, тогда как дополнительная стимуляция клеток сопровождается дополнительным увеличением уровня как CD69, так и CD38 [7, 11]. Следует также упомянуть и том, что последний антиген – CD38 – в случае В-лимфоцитов и натуральных киллерных клеток рассматривается большинством исследователей как маркер «дифференцировки» или созревания, которые характеризуют «степень зрелости» клеток, нежели их активационный статус.

Плотность мощности, мкВт/см ²	Т-лимфоциты, %				В-лимфоциты, %			
	CD69+ CD38–	CD69+ CD38+	CD69– CD38+	CD69– CD38–	CD69+ CD38–	CD69+ CD38+	CD69– CD38+	CD69– CD38–
контроль	5,0±0,8	8,8±1,4	52,2±2,9	34,0±2,6	9,6±1,0	27,7±1,8	49,5±2,0	13,1±2,2
0,03	5,0±0,7	9,1±1,9	52,9±2,9	33,0±2,5	9,5±1,2	29,0±2,0	49,2±2,2	12,2±1,8
0,63	5,2±0,7	9,3±1,6	52,1±2,8	33,5±2,6	9,8±1,2	29,9±1,7	48,6±2,0	11,7±1,7
9,55	5,1±0,5	9,1±1,5	52,2±2,6	33,6±2,7	9,4±1,0	29,0±1,7	49,6±1,8	12,1±1,7
Плотность мощности, мкВт/см ²	NK %, %				NKT, %			
	CD69+ CD38–	CD69+ CD38+	CD69– CD38+	CD69– CD38–	CD69+ CD38–	CD69+ CD38+	CD69– CD38+	CD69– CD38–
контроль	1,5±0,3	72,7±5,0	23,5±4,8	2,3±0,5	18,2±2,6	15,6±0,7	32,5±3,9	33,7±3,2
0,03	1,8±0,4	72,0±4,7	23,8±4,5	2,4±0,6	18,7±2,9	16,6±1,5	32,2±3,9	32,5±3,5
0,63	1,7±0,3	72,4±4,7	23,8±4,5	2,1±0,5	18,7±2,6	16,7±1,3	32,8±3,9	31,8±3,3
9,55	1,8±0,3	72,2±4,6	23,8±4,3	2,2±0,5	19,6±2,7	16,7±1,5	32,2±3,5	31,4±2,9

Таблица. Процентное распределение клеток по наличию в них маркеров активации ($\bar{X} \pm s$, $n=18$, \bar{X} – среднее; s – ошибка; n – число наблюдений по одной точке)

Анализ литературы показал отсутствие влияния на кинетику клеточного цикла, образование микроядер, на индекс пролиферации и индукцию микроядер клеток с блоком цитогенеза при облучении в течение 20 мин лимфоцитов периферической крови человека лазером на свободных электронах на частотах 0,12 и 0,13 ТГц и средней мощности 1 мВт и 0,6 мВт соответственно [3].

Отсутствие влияния на кинетику клеточного цикла лимфоцитов было также подтверждено другими исследователями при использовании излучения частоты 0,13 ТГц (20 мин) в диапазоне мощностей 0,15–5 мВт/см². Ими же было отмечено, что ТГц излучение не вызывает повреждения хромосом (MN-анализ) [4].

Воздействие ТГц излучением (0,1 ТГц, 31 мкВт/см²) длительностью 60, 120 и 1440 мин вызывает нестабильность генома в лимфоцитах [5]. Однако, по мнению G.J. Wilmink, эти результаты должны рассматриваться с осторожностью [12].

Во всех вышеперечисленных исследованиях использовали непрерывные источники излучения. Также в указанных работах плотности мощности ТГц излучения и длительности облучения значительно превышают применяемые нами в эксперименте (9,55; 0,63 и 0,03 мкВт/см², 1 мин). Только работа [5] сравнима с нашей по плотности мощности (31 мкВт/см²). Однако большое количество публикаций по воздействию именно слабых полей показывает, что излучение слабой интенсивности может приводить к биологическим эффектам, которые не наблюдаются при излучении большей мощности. Так основные возможные механизмы касательно волн миллиметрового и субмиллиметрового (ТГц) диапазона рассмотрены в работе [13]. Стоит отметить также, что проведенные нами ранее эксперименты на нервных клетках [14] показали, что именно снижение плотности мощности при облучении широкополосным ТГц излучением приводит к стимуляции клеточного роста. Исходя из этого, нами были выбраны данные плотности мощности.

В связи с тем, что основной практический интерес к использованию ТГц излучения в медицине сейчас направлен на создание диагностических ТГц приборов, то продолжительность длительности облучения, на наш взгляд, целесообразно определять из длительности процедуры диагностики на данных приборах. Так как время сканирования составляет несколько минут, то нами на данном этапе работы была выбрана длительность излучения 1 мин.

В нашем исследовании ТГц излучение с плотностью мощности 9,55; 0,63 и 0,03 мкВт/см² в течение 1 мин не привело к изменению функциональной активности лимфоцитов. Возможно, что именно

увеличение продолжительности облучения может оказать влияние на активацию клеток. Варьирование параметров облучения будет являться следующим этапом наших исследований.

Заключение

Анализ уровня экспрессии маркеров клеточной активации (CD38 и CD69) лимфоцитов (Т-лимфоцитов, В-лимфоцитов, натуральных киллеров и НКТ-клеток) показал, что в ответ на воздействие импульсного ТГц излучения диапазона 0,05–1,2 ТГц с плотностью мощности 9,55; 0,63; 0,03 мкВт/см² в течение 1 мин не происходит достоверного увеличения количества лимфоцитов, содержащих данные маркеры.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № 14.512.11.0020).

Литература

1. Киричук В.Ф., Андронов Е.В., Антипова О.Н., Иванов А.Н., Креницкий А.П., Крылова Я.А., Сухова С.В., Цымбал А.А. Влияние электромагнитных волн терагерцового диапазона на живые системы // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. – 2012. – № 2 (6). – С. 421–425.
2. Zeni O., Gallerano G.P., Perrotta A., Romanò M., Sannino A., Sarti M., D'Arienzo M., Doria A., Giovenale E., Lai A., Messina G., Scarfi M.R. Cytogenetic observations in human peripheral blood leukocytes following in vitro exposure to THz radiation: a pilot study // *Health Phys.* – 2007. – V. 92 (4). – P. 349–357.
3. Scarfi M.R., Romano M., Di Pietro R., Zeni O., Doria A., Gallerano G.P., Giovenale E., Messina G., Lai A., Campurra G., Coniglio D., D'Arienzo M. THz Exposure of Whole Blood for the Study of Biological Effects on Human Lymphocytes // *Journal of Biological Physics.* – 2003. – V. 29. – P. 171–177.
4. Doria A., Gallerano G.P., Giovenale E., Messina G., Lai A., Ramundo-Orlando A., Sposato V., D'Arienzo M., Perrotta A., Romano M., Sarti M., Scarfi M.R., Spassovsky I., Zeni O. THz radiation studies on biological systems at the ENEA FEL facility // *Infrared Physics & Technology.* – 2004. – V. 45. – P. 339–347.
5. Korenstein-Ilan A., Barbul A., Hasin P., Eliran A., Gover A., Korenstein R. Terahertz radiation increases genomic instability in human lymphocytes // *Radiation Research.* – 2008. – V. 170. – № 2. – P. 224–234.
6. Dos Santos D.C., Neves P.C., Azeredo E.L., Pelajo-Machado M., Martinho J.M., Pacheco-Moreira L.F., Araujo C.C., Cruz O.G., de Oliveira J.M., Pinto M.A. Activated lymphocytes and high liver expression of IFN- γ are associated with fulminant hepatic failure in patients // *Liver Int.* – 2012. – V. 32 – № 1. – P. 147–157.
7. Slyker J.A., Lohman-Payne B., John-Stewart G.C., Dong T., Mbori-Ngacha D., Tapia K., Atzberger A., Taylor S., Rowland-Jones S.L., Blish C.A. The impact of HIV-1 infection and exposure on natural killer (NK) cell phenotype in Kenyan infants during the first year of life // *Front Immunol.* – 2012. – V. 3. – P. 399–406.
8. Caruso A., Licenziati S., Corulli M., Canaris A.D., De Francesco M.A., Fiorentini S., Peroni L., Fallacara F., Dima F., Balsari A., Turano A. Flow cytometric analysis of activation markers on stimulated T cells and their correlation with cell proliferation // *Cytometry.* – 1997. – V. 27. – № 1. – P. 71–76.
9. Deterre P., Berthelie V., Bauvois B., Dalloul A., Schuber F., Lund F. CD38 in T- and B-cell functions // *Chem. Immunol.* – 2000. – V. 75. – P. 146–168.
10. Reddy M, Eirikis E, Davis C, Davis HM, Prabhakar U. Comparative analysis of lymphocyte activation marker expression and cytokine secretion profile in stimulated human peripheral blood mononuclear cell cultures: an in vitro model to monitor cellular immune function // *J. Immunol. Meth.* – 2004. – V. 293. – № 1–2. – P. 127–142.
11. Montoya C.J., Catano J.C., Ramirez Z., Rugeles M.T., Wilson S.B., Landay A.L. Invariant NKT cells from HIV-1 or Mycobacterium tuberculosis-infected patients express an activated phenotype // *Clin. Immunol.* – 2008. – V. 127. – P. 1–6.
12. Wilmink G.J., Grundt J.E. Invited Review Article: Current State of Research on Biological Effects of Terahertz Radiation // *J. Infrared Milli Terahz Waves.* – 2011. – V. 32. – P.1074–1122.
13. Бецкий О. В., Лебедева Н. Н. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты // *Миллиметровые волны в биологии и медицине.* – 2001. – № 4. – С. 5–12.
14. Цуркан М.В., Собакинская Е.А., Смолянская О.А., Беспалов В.Г., Вакс В.Л., Балбекин Н.С. Исследование спектра молекулы ДНК в терагерцовой области частот // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* – 2012. – № 1 (77). – С. 15–19.

- Цуркан Мария Валериевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tsurkan.maria@yandex.ru
- Кудрявцев Игорь Владимирович* – ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, Дальневосточный федеральный университет, Санкт-Петербургский государственный университет; кандидат биологических наук, доцент; igorek1981@yandex.ru
- Серебрякова Мария Константиновна* – Санкт-Петербургский государственный университет, студент, m-serebyakova@yandex.ru
- Трулев Андрей Сергеевич* – ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, научный сотрудник, trulioff@gmail.com
- Снегова Анастасия Михайловна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, snegova_anastasia@mail.ru
- Смолянская Ольга Алексеевна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, o_smolyanskaya@mail.ru
- Полевщиков Александр Витальевич* – Дальневосточный федеральный университет, зав. кафедрой; ФГБУ «НИИ экспериментальной медицины» СЗО РАМН, вед. научный сотрудник; доктор биологических наук, профессор; Alexpol512@yandex.ru
- Балбекин Николай Сергеевич* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, godnikolay@yandex.ru

УДК 535.34

ФОТОСТИМУЛИРОВАННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ НАНОМЕТРОВЫХ СЛОЕВ МОЛЕКУЛ ПОЛИМЕТИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

А.А. Старовойтов, Е.Н. Калитеевская, В.П. Крутякова, Т.К. Разумова

Исследованы механизмы изменения конформационного состава и пространственной переориентации нанокомпонентов органических тонких пленок под действием лазерного излучения. Разработана модель перестройки структуры слоя в результате резонансного фотовозбуждения. В слоях полиметиновых молекул на стеклянной подложке выделено два стереоизомера и две агрегированные формы. Каждый компонент может иметь две пространственные ориентации, отличающиеся углами наклона дипольного момента оптического перехода. Фотовозбуждение вызывает необратимое преобразование типа ориентации слоя, а также взаимное преобразование нанокомпонентов слоя.

Ключевые слова: полиметиновый краситель, изомер, агрегат, тонкие пленки, молекулярные слои, лазер, поглощение.

Введение

Молекулярные слои, состоящие из нанокомпонентов, используются при создании солнечных батарей, диодов, дихроичных цветных светофильтров для устройств на жидких кристаллах и полевых транзисторов для оптоэлектронных устройств [1], а также для записи информации с помощью фото- [2] или термодеструкции [3] компонентов слоя. Фотостимулируемые процессы в слоях органических молекул (изменение пространственной ориентации молекулярных компонентов относительно поверхности, а также изменение компонентного состава слоя) дают принципиальную возможность записи и считывания информации оптическими методами без деструкции слоя [4]. В настоящей работе исследованы процессы фотостимулированной перестройки молекулярных слоев на примере полиметиновых красителей (ПК) на стеклянных подложках [5].

Образцы и методики

Объекты исследования – слои симметричных дикарбоцианиновых соединений с концевыми гетероциклическими группами разного строения и с разной величиной электронодонорности Φ_0 (рис. 1, а). Слои наносились на вращающиеся стеклянные подложки из раствора ПК в этиловом спирте. Пространственная ориентация дипольного момента перехода молекулярных компонентов оценивалась по спектрам поляризованного поглощения. Поверхностная концентрация молекул во всех компонентах (N_{sm}) определялась по концентрации молекул ПК в этанольном растворе, полученном при смывании слоя [6]. Фотостимулированная перестройка структуры слоя осуществлялась излучением моноимпульсных лазеров (длительность импульса около 20 нс, поверхностная плотность энергии на образце $E_s \leq 100$ мДж). Спектры поглощения были измерены на спектрофотометре СФ-56 производства ОКБ «Спектр» (ЛОМО).

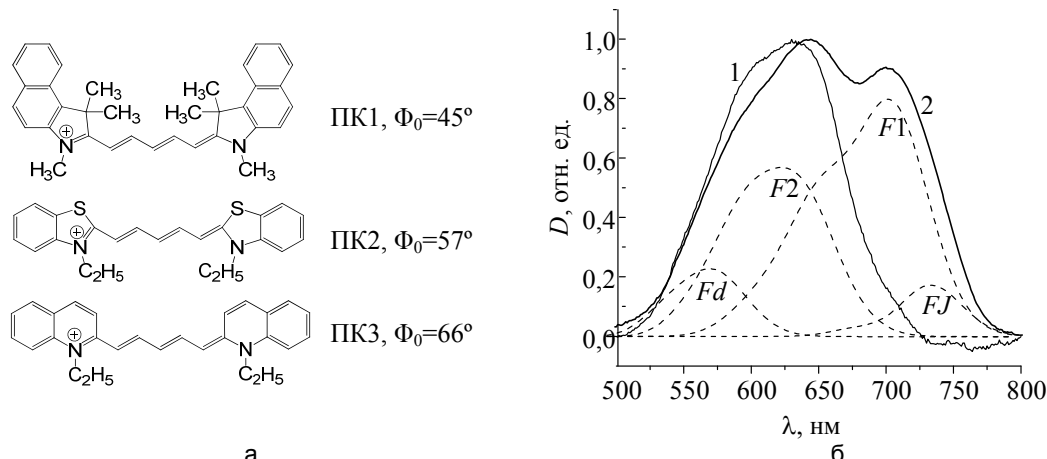


Рис. 1. Структура исследованных ПК (а); нормированные спектры поглощения и спектры молекулярных компонентов слоев ПК1 (б). Оптическая плотность поглощения в максимуме D_{max} : 0,00357(1); 0,047071 (2)

Результаты исследования

Сопоставление спектров поглощения слоев разной толщины показало, что компонентный состав зависит от N_{sm} и от Φ_0 . В спектрах слоев ПК1 (рис. 1, б) содержатся полосы следующих компонентов

(форм молекул): двух стереоформ – all-trans- и топосis-изомер соответственно ($F1$ и $F2$), димера (Fd) и J -агрегата (FJ). В моносолях присутствуют только изомеры. Уменьшение N_{sm} приводит к падению относительной концентрации $F1$ и к росту $F2$. В субмоносолях ПК1 ($N_{sm} < 3 \cdot 10^{13}$ молекул/см²) существует только полоса $F2$. Общие закономерности влияния поверхностной концентрации на компонентный состав слоев ПК2 и ПК3 сходны.

На рис. 2 представлены спектры поглощения слоев ПК2. В слоях присутствуют полосы изомеров $F1$, $F2$ и ассоциаты $Fd1$ и FJ . Увеличение Φ_0 концевых групп вызывает появление еще одной длинноволновой полосы ($Fd2$) – вероятнее всего, второй полосы димера. Уменьшение N_{sm} приводит к падению концентрации $F1$, росту концентрации $F2$ и к появлению двух коротковолновых форм (вначале $F3$, а затем $F4$).

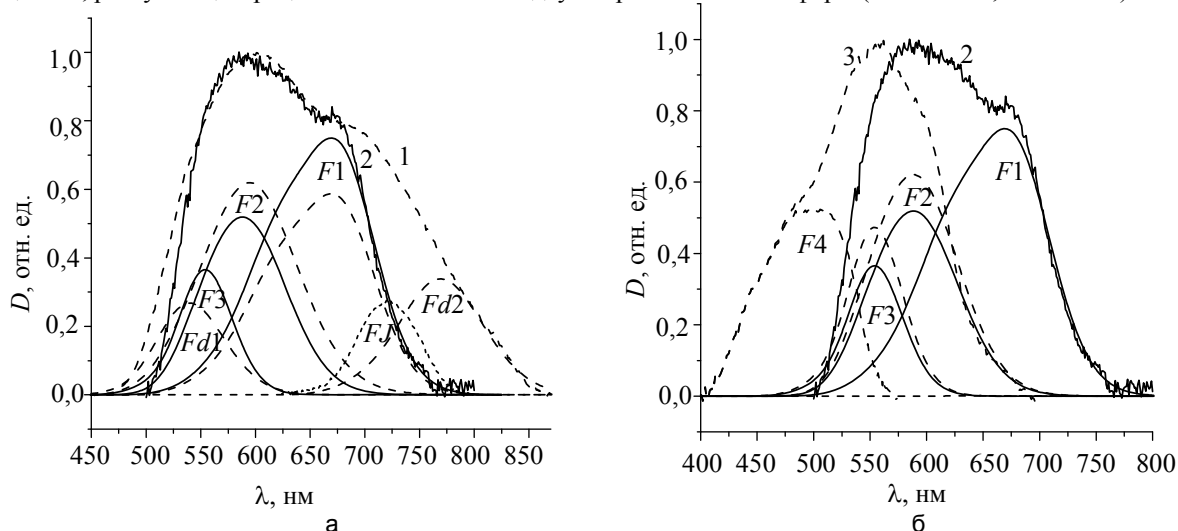


Рис. 2. Нормированные спектры поглощения и спектры молекулярных компонентов слоев ПК2. Оптическая плотность поглощения в максимуме D_{max} : 0,0405 (1 на а); 0,0052 (2 на а, б); 0,0027 (3 на б)

Облучение слоя ПК1 моноимпульсами с $\lambda_{exc} = 694$ нм, преимущественно возбуждающими $F1$, приводит к изменению углов (θ_i) между дипольными моментами переходов с поглощением относительно вертикали к поверхности подложки. При $E_s \geq 10$ мДж/см² величины θ_1 , θ_2 и θ_J растут, угол θ_d уменьшается. Зависимости θ_i от суммарной плотности энергии возбуждения (ΣE) имеют насыщающийся характер (рис. 3, а). Предельно достижимое значение углов θ_{isat} в области насыщения и величины ΣE_{sat} , соответствующие выходу на насыщение, зависят от E_s и от отношения плотности поглощения D_{694} к исходной величине N_{sm} (рис. 3, б). При малых значениях $E_s \leq 8$ мДж/см² относительные изменения углов ориентации $F2$ и Fd существенно меньше, чем для $F1$ и FJ .

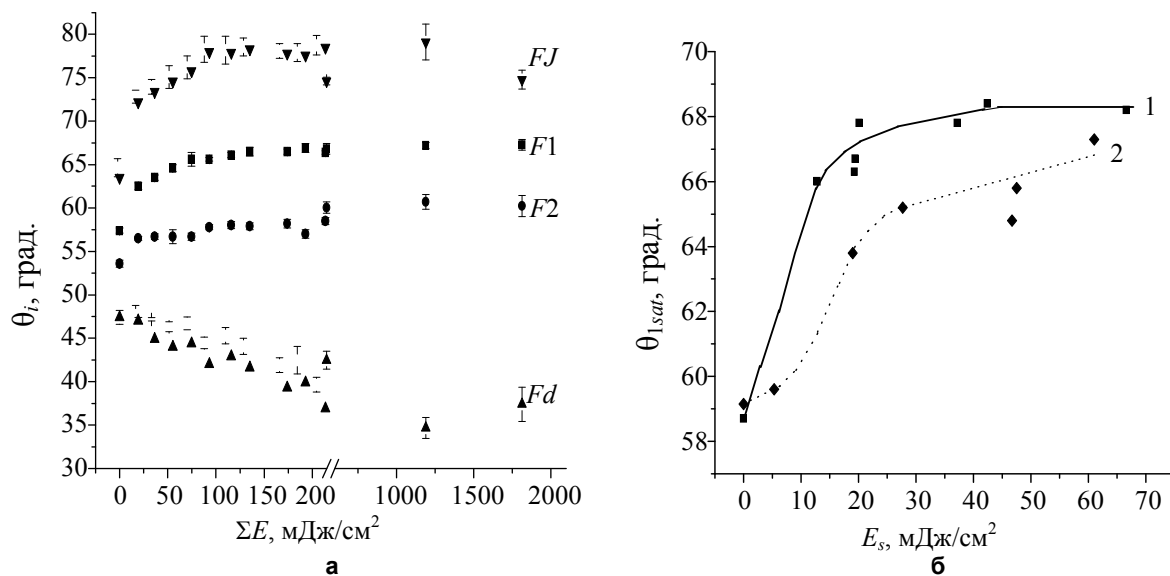


Рис. 3. Изменение угла ориентации компонентов (θ_i) слоя ПК1 в результате возбуждения моноимпульсами с $\lambda_{exc} = 694$ нм и $E_s = 19$ мДж/см² (а); зависимость величины предельных углов ориентации (θ_{isat}) формы $F1$ слоя ПК1 от величины E_s (б). Отношение $(D_{694}/N_{sm}) \cdot 10^{17}$: $5,45 \pm 0,5$ см²/молекул (1); $3,91 \pm 0,6$ см²/молекул (2)

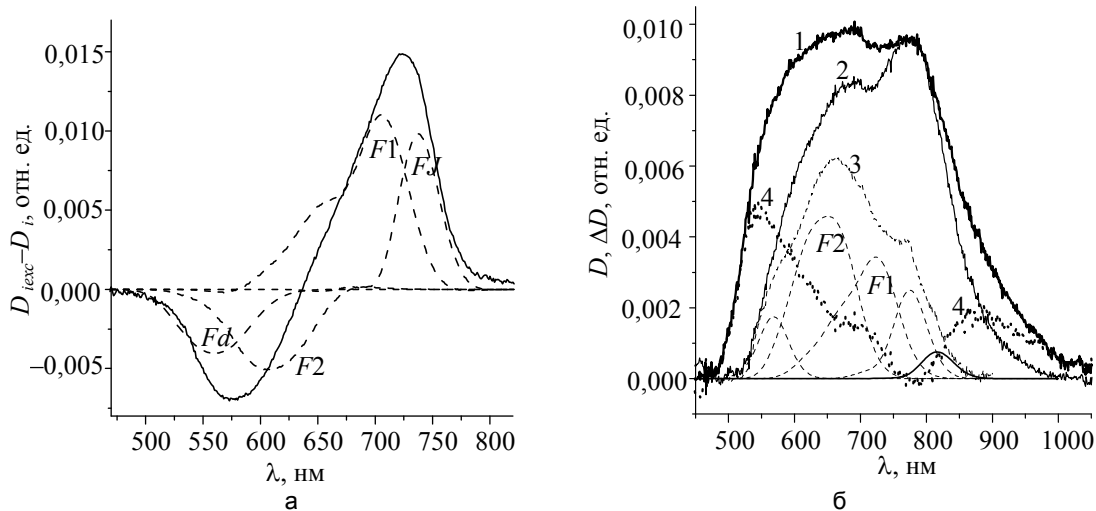


Рис. 4. Разность спектров слоя ПК1 и спектров молекулярных компонентов до и после возбуждения моноимпульсом с $\lambda_{exc} = 694$ нм и $E_s = 19$ мДж/см² (а); спектры поглощения слоев ПК3 до (1, 3) и после (2) облучения, 4 – разность спектров 1 и 2 (б). Слои нанесены из растворов с $K_{max} = 583$ см⁻¹ (1, 2), $K_{max} = 449$ см⁻¹ (3)

Переход к импульсам излучения с $\lambda_{exc} = 730$ нм, возбуждающим FJ в стоксовой и $F1$ в антистоксовой областях спектра поглощения, не приводит к принципиальным изменениям характера перестройки слоя. Меняются лишь количественные соотношения между E_s и θ_{isat} . При $(D_{694}/N_{sm}) \cdot 10^{17} = 4,3$ см²/молекул изменения углов θ_2 и θ_d наблюдаются только при $E_s > 30$ мДж/см². При $E_s = 100$ мДж/см² меняются все углы, но величина θ_{isat} ($65,5^\circ$) заметно меньше предельных значений θ_{isat} при $\lambda_{exc} = 694$ нм.

Резонансное возбуждение компонентов слоя ПК1 приводит к падению относительной концентрации $F2$ и димеров и к росту концентрации $F1$ и FJ (рис. 4, а). При малых E_s зависимости $N_i/N_{sm} = f(\Sigma E)$ насыщаются. При больших E_s относительная концентрация возбуждаемых компонентов по мере роста ΣE сначала увеличивается, а затем падает. Наблюдаемые закономерности, очевидно, связаны с деструкцией возбуждаемых компонентов. При облучении слоя ПК3 происходит увеличение оптической плотности в области полос поглощения $F1$ и FJ и падает поглощение в полосах $F2$, $Fd1$ и $Fd2$ (рис. 4, б). Это подтверждает вывод о связи полосы $Fd2$ с димерами.

Обсуждение результатов

Наблюдаемые зависимости компонентного состава слоя от толщины связаны с асимметрией взаимодействия молекулярных компонентов с подложкой, приводящей к асимметрии внутримолекулярного распределения электронной плотности. Степень такой асимметрии растет по мере увеличения величины Φ_0 и уменьшения толщины слоя. Сопоставление с растворами несимметричных ПК [7] позволяет сделать вывод, что $F2$, $F3$ и, возможно, $F4$ имеют строение мономолекулярных *cis*-стереоизомеров, равновесные концентрации которых растут по мере увеличения электронной асимметрии молекулы ПК в слое.

Пространственная перестройка невозбуждаемых излучением молекулярных форм (Fd и $F2$), увеличение вероятности перестройки этих форм с ростом E_s и отношения D_{694}/N_{sm} , позволяют сделать вывод, что изменение углов ориентации этих форм связано с нагревом слоя.

Увеличение вероятности перестройки ориентации компонентов слоя при преимущественном возбуждении *all-trans*-изомера $F1$ по сравнению со случаем одновременного возбуждения $F1$ и J -агрегата свидетельствует о связи первичных этапов перестройки с процессами стереоизомеризации в возбужденном состоянии $F1$. Вероятность этих процессов увеличивается в результате нагрева слоя.

Заключение

В работе были изучены механизмы перестройки структуры слоев симметричных полиметиновых красителей под действием наносекундных лазерных импульсов. Компонентный состав слоев включает в себя несколько видов стереоизомеров молекул и две агрегированные формы, которые имеют различные углы наклона. Резонансное фотовозбуждение *all-trans*-изомера ($F1$) приводит к стереоизомеризации, что вызывает необратимую переориентацию всех компонентов и их взаимное преобразование. Отмечено, что повышение плотности энергии импульса или повышение поверхностной концентрации молекул приводит к увеличению вероятности перестройки слоя за счет большего нагрева.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии записи и считывания информации световым методом в молекулярных слоях полиметиновых красителей без деструкции.

Литература

1. Wright J.D. *Molecular Crystals*. – Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – 221 p.
2. Yang W., Donong G., Fuxi G. Optical Recording Properties of a Novel Subphthalocyanine Thin Film // *Phys. Stat. Sol. A*. – 2001. – V. 186. – № 1. – P. 71–77.
3. Kravets V.G., Vinnichenko K.L., Prygun O.V. Characterization and optical properties of organic dye films as recording media // *Semiconduct. Phys., Quant. Electr. and Optoelectronics*. – 2000. – V. 3. – № 4. – P. 520–522.
4. Kaliteevskaya E.N., Krutyakova V.P., Razumova T.K., Starovoytov A.A. Mechanisms of the changes in the conformational composition and spatial reorientation of molecular components of a dicarbocyanine dye layer induced by heating or resonance photoexcitation // *Proc. SPIE*. – 2007. – V. 6728. – P. 67281X-1–67281X-6.
5. Ищенко А.А. Структура и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей. – Киев: Наукова думка, 1994. – 232 с.
6. Калитеевская Е.Н., Крутякова В.П., Разумова Т.К., Старовойтов А.А. Механизмы формирования компонентного состава молекулярных слоев полиметиновых красителей // *Оптика и спектроскопия*. – 2011. – Т. 110. – № 3. – С. 398–405.
7. Разумова Т.К., Тарновский А.Н. Влияние условий возбуждения на соотношения концентраций фотостереоизомеров и кинетику их релаксации в 3,3-диэтилтиадикарбодиазин иодиде // *Оптика и спектроскопия*. – 1992. – Т. 73. – № 6. – С. 1113–1126.

- Старовойтов Антон Андреевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, anton.starovoytov@gmail.com
- Калитеевская Елена Николаевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, lenakalit@yandex.ru
- Крутякова Валентина Павловна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник, krutyakova@mail.ru
- Разумова Татьяна Константиновна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, вед. научный сотрудник, tatyana_razumova@mail.ru

УДК 533.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБИДА МОЛИБДЕНА В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ РАЗРЯДЕ

А.А. Тихомиров, В.И. Сысун, Л.А. Алешина, А.С. Устинов

Рассмотрена возможность формирования карбида молибдена в импульсном электроэрозионном разряде на основе модифицированной схемы Блюмляйна. Полученные образцы материала исследовались рентгенографическим методом. Анализ дифракционных картин показал, что на поверхности молибдена в процессе взаимодействия с углеродом в электроэрозионном разряде образуется пленка карбидов.

Ключевые слова: карбид молибдена, импульсный электроэрозионный разряд.

Введение

Электроэрозионный разряд успешно применяется для нанесения покрытий, резки, получения порошков и т.д. [1]. Электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под воздействием электрических разрядов в результате электрической эрозии. Метод был разработан во время Великой Отечественной войны Б.Р. и Н.И. Лазаренко, предложившими использовать обычно вредную электрическую эрозию контактов для технологических целей обработки материалов. Процесс происходит в рабочей жидкости, которая заполняет пространство между электродами, при этом один из электродов – заготовка, а другой электрод – инструмент.

Привлекательность электроэрозионного метода заключается в том, что он позволяет использовать в качестве исходного сырья для получения порошков практически любые токопроводящие материалы. Отличительной чертой метода является его энергоэффективность и экологичность [2]. Целью настоящей работы является рассмотрение возможности получения карбида молибдена электроэрозионным методом.

Относительно недавно рассмотрена возможность получения карбида молибдена и вольфрама методом высокотемпературного электрохимического синтеза [3, 4]. Одно из основных применений карбида молибдена заключается в его использовании в композитных материалах [5, 6], что позволяет существенно повысить их механическую прочность. Возможность применения электроэрозионного метода для получения карбидов молибдена остается плохо изученной.

Метод получения порошков карбида молибдена

Как известно, эффективность электроэрозионного размола определяется не только величиной, вводимой в импульсе электрической мощности, но и скоростью ввода мощности [7]. Для обеспечения высокой скорости ввода электрической мощности использовалась несколько модифицированная для условий задачи схема Блюмляйна [8] (рис. 1).

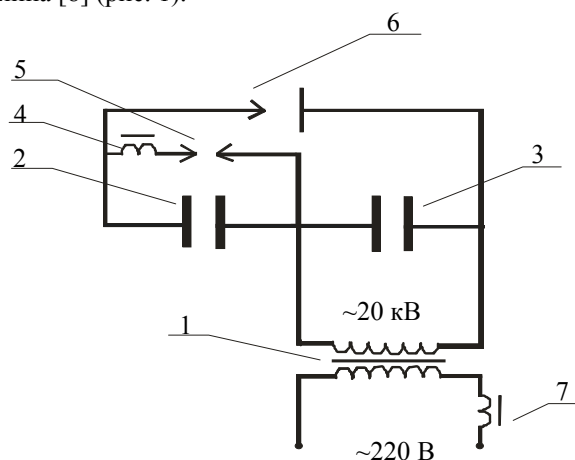


Рис. 1. Принципиальная схема источника питания: 1 – высоковольтный трансформатор; 2, 3 – высоковольтные конденсаторы; 4, 7 – дроссель; 5 – коммутатор; 6 – разрядная камера

Экспериментальная установка состоит из высоковольтного трансформатора 1, высоковольтных конденсаторов 2 и 3, дросселей 4 и 7, коммутатора 5. Повышающий трансформатор 1 преобразует напряжение с действующего напряжения 220 В промышленной частоты в напряжение 20 кВ и заряжает конденсатор 3 в каждый из полупериодов напряжения с соответствующей сменой полярности. Для ограничения зарядного тока конденсаторов 2 и 3 в первичную цепь трансформатора установлен дроссель 7. Параллельно высоковольтному конденсатору 3 включены последовательно соединенные дроссель 4 и коммутатор 5. При достижении на высоковольтном конденсаторе 2 заданного значения напряжения коммутатор включает дроссель 4 параллельно высоковольтному конденсатору 2 и перезаряжает его. Скорость нарастания напряжения на разрядной камере 6 определяется скоростью перезарядки высоковольтного конденсатора 2.

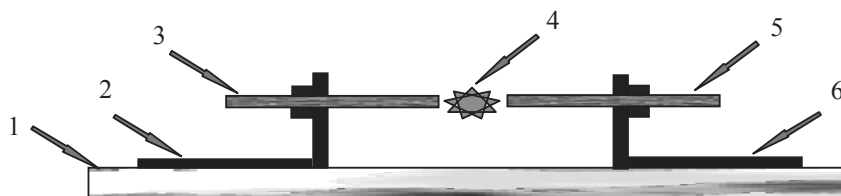


Рис. 2. Устройство коммутатора: 1 – диэлектрическая пластина; 2, 6 – металлические держатели; 3, 5 – электроды; 4 – разрядный канал

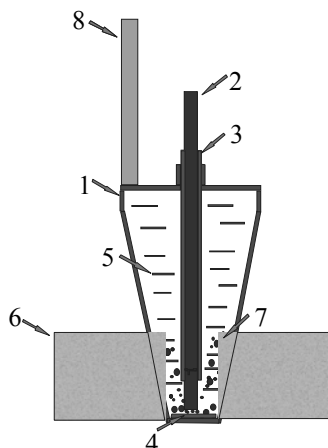


Рис. 3. Разрядная камера: 1 – корпус камеры; 2 – графитовый стержень; 3 – высоковольтный изолятор; 2, 4 – рабочий электрод; 5 – рабочая жидкость; 6 – держатель; 7 – рабочий материал

Устройство коммутатора 5 показано на рис. 2. Коммутатор состоит из диэлектрической пластины 1 с закрепленными металлическими держателями 2 и 6, в которые вкручиваются электроды 3 и 5 с возможностью изменения величины разрядного промежутка между рабочими электродами. При достижении заданного напряжения воздушный промежуток между электродами 3 и 5 пробивается с образованием разрядного канала 4, и омическое сопротивление коммутатора становится малым, при снижении напряжения разряд между электродами прекращается и омическое сопротивление восстанавливается.

Разрядная камера представлена на рис. 3. Она состоит из держателя 6, корпуса камеры 1, демпферной трубки 8, рабочих электродов 2 и 4, высоковольтного изолятора 3. В качестве рабочего электрода 2 использовался цилиндрический стержень графита, в качестве рабочего электрода 4 – пластина из молибдена, в качестве рабочей жидкости – дистиллированная вода. Демпферная трубка 8 служит расширительным каналом для рабочей жидкости 5, в которой в результате воздействия электроэрозионного разряда нарабатывается рабочий материал 7.

В табл. 1 представлены основные данные по электрическим параметрам элементов, входящих в состав экспериментальной установки.

Емкость высоковольтных конденсаторов, мкФ	Расстояние между электродами коммутатора, мм	Индуктивность балластного сопротивления, Гн	Рабочая жидкость, тип	Амплитуда напряжения на выходе источника питания, кВ, не менее
0,047	20	3	Вода дистиллированная	20

Таблица 1. Основные электрические параметры установки для эрозионного разряда

После наработки рабочего материала вода отстаивалась, и осевший на рабочий электрод 4 (рис. 3) порошок исследовался методом рентгенографического анализа.

Рентгенографические исследования полученных порошков

Рентгеновские дифракционные картины были получены на установке ДРОН-3М в автоматическом режиме в интервале углов рассеяния от 3° до 145° с шагом 0,1° на FeK_{α} излучении. Монохроматор падающих лучей – пиролитический графит. Регистрировались рентгенограммы двух областей образца –: области, на поверхности которой был пористый слой черного цвета, и светлой области. Соответствующие рентгенограммы (диапазон отражений) представлены на рис. 4. Видно, что наблюдаются как интенсивные, так и слабые отражения, причем наибольшее различие рентгенограмм имеет место в области слабых отражений.

Качественный фазовый анализ проводился путем сравнения экспериментальных рентгенограмм с рентгенограммами, теоретически рассчитанными по данным об атомной структуре молибдена, карбидов молибдена различного состава и углеродных аллотропных фаз, представленным в базе кристаллографических характеристик неорганических соединений ICSD (The inorganic crystal structure database). Было установлено, что сильные линии – это отражение линии (002) графита и линий (110), (200), (211), (220) молибдена (рис. 4).

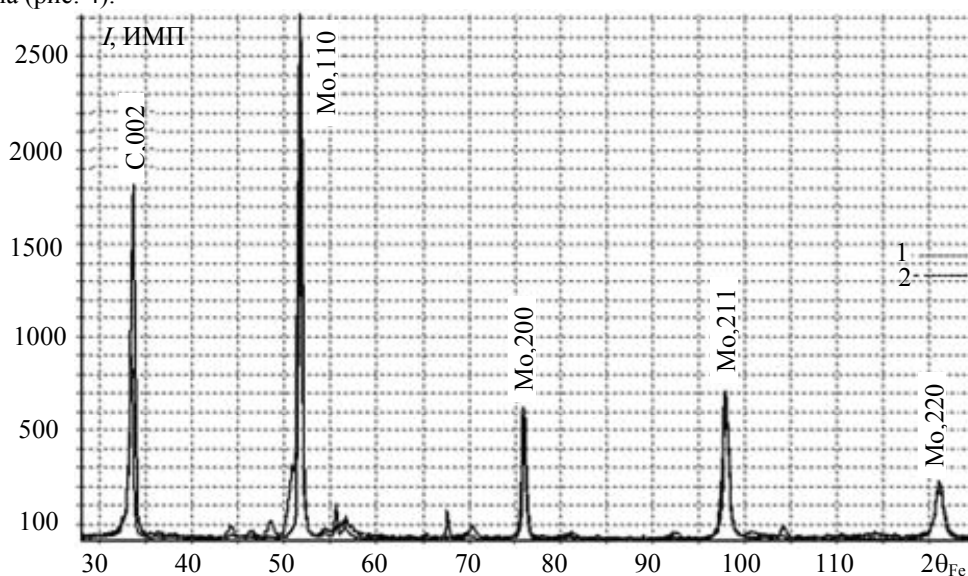


Рис. 4. Рентгенограммы двух областей образца: 1 – светлая область; 2 – темная область

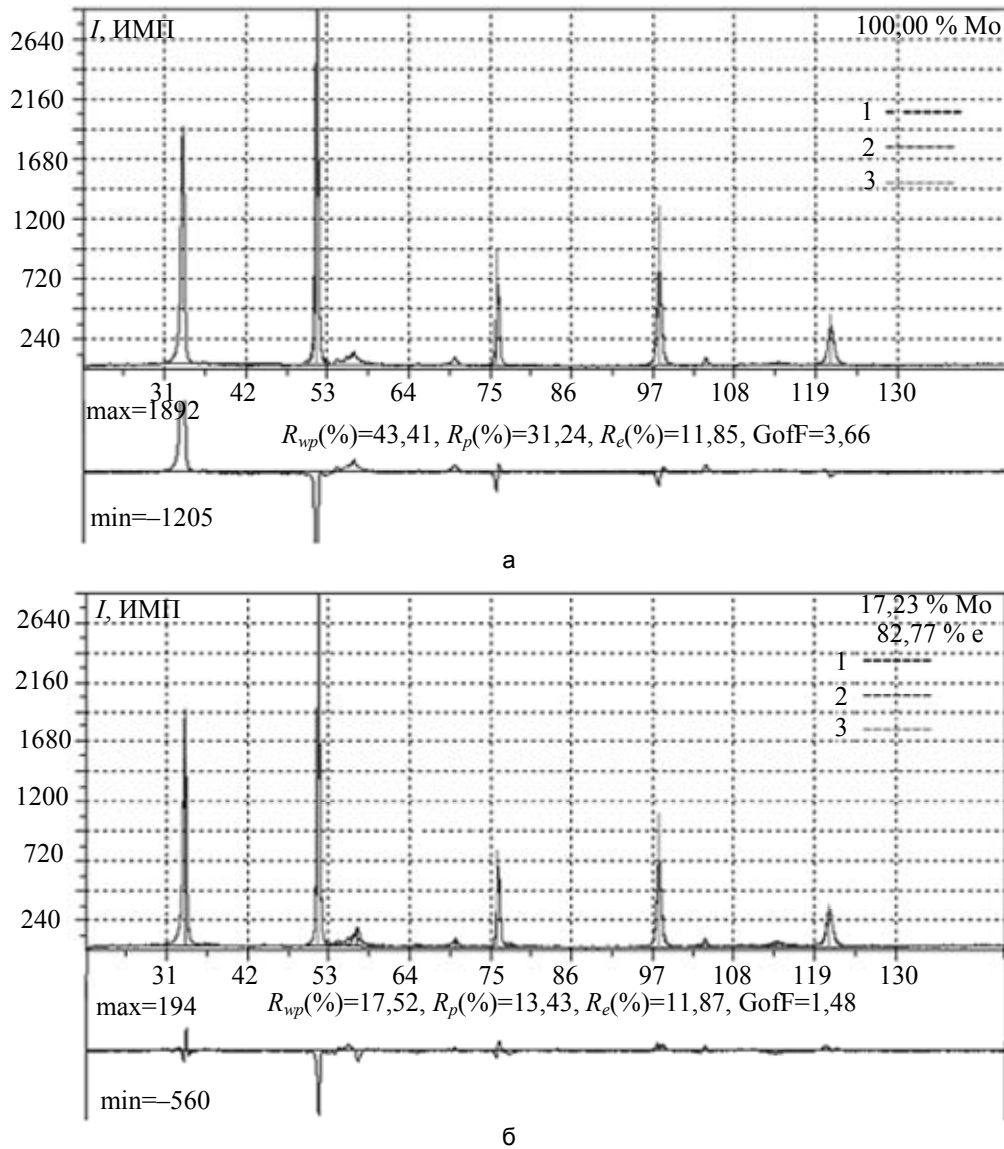


Рис. 5. Этапы расчета рентгенограмм: расчет рентгенограммы с учетом только фазы молибдена (а); расчет рентгенограммы с учетом фазы молибдена и гексагонального графита (б). 1 – экспериментальная рентгенограмма; 2 – расчетная рентгенограмма; 3 – отметки фазы молибдена. Под графиками (а) и (б) показаны разностные кривые

Дальнейший анализ дифракционных картин проводился методом Ритвельда.

На первом этапе в расчет принималась только фаза молибдена с объемно-центрированной кубической решеткой, пространственная группа симметрии $Im\bar{3}m$. Весовой профильный фактор недоверности R_{wp} составил 43%. После учета вклада, вносимого рассеянием гексагонального графита (пространственная группа симметрии $P6_3mc$), профильный фактор недоверности R_{wp} уменьшается до 17,5%. Из анализа (рис. 5, б) видно, что все линии экспериментальной рентгенограммы описываются рентгенограммой молибденовой подложки и слоя гексагонального графита на ней в соотношении 83:17. Таким образом, рассеяние области с черным слоем состоит из рассеяния молибденовой подложкой и осадком графита на ней.

На рис. 6 приведены результаты трех этапов расчета рентгенограммы светлой области. На первом этапе учета рассеяния только фазой молибдена с объемно-центрированной кубической решеткой весовой профильный фактор недоверности R_{wp} составил 41% (рис. 6, а). После учета вклада, вносимого рассеянием гексагонального графита, профильный фактор недоверности R_{wp} уменьшился до 30% (рис. 6, б). Оставшиеся слабые отражения наиболее корректно описывались совокупностью вклада двух фаз карбида молибдена Mo_2C , понижая профильный фактор недоверности R_{wp} до 21%. Структура данных фаз показана на с рис. 7. Вклады в рассеяние составили для гексагонального графита 65%, для молибдена 28% и для смеси карбидов 7%.

Высокое значение профильного фактора недоверности связано в первую очередь с наличием на рентгенограмме нескольких слабых неидентифицированных отражений (рис. 6, в). Кроме того, следует

отметить, что не уточнялись координаты и параметры теплового движения атомов. Рассеяние подложкой молибдена ослабляется за счет присутствия на его поверхности слоя карбида. Уточненные периоды элементарных ячеек (a , b , c) карбидов приведены в табл. 2.

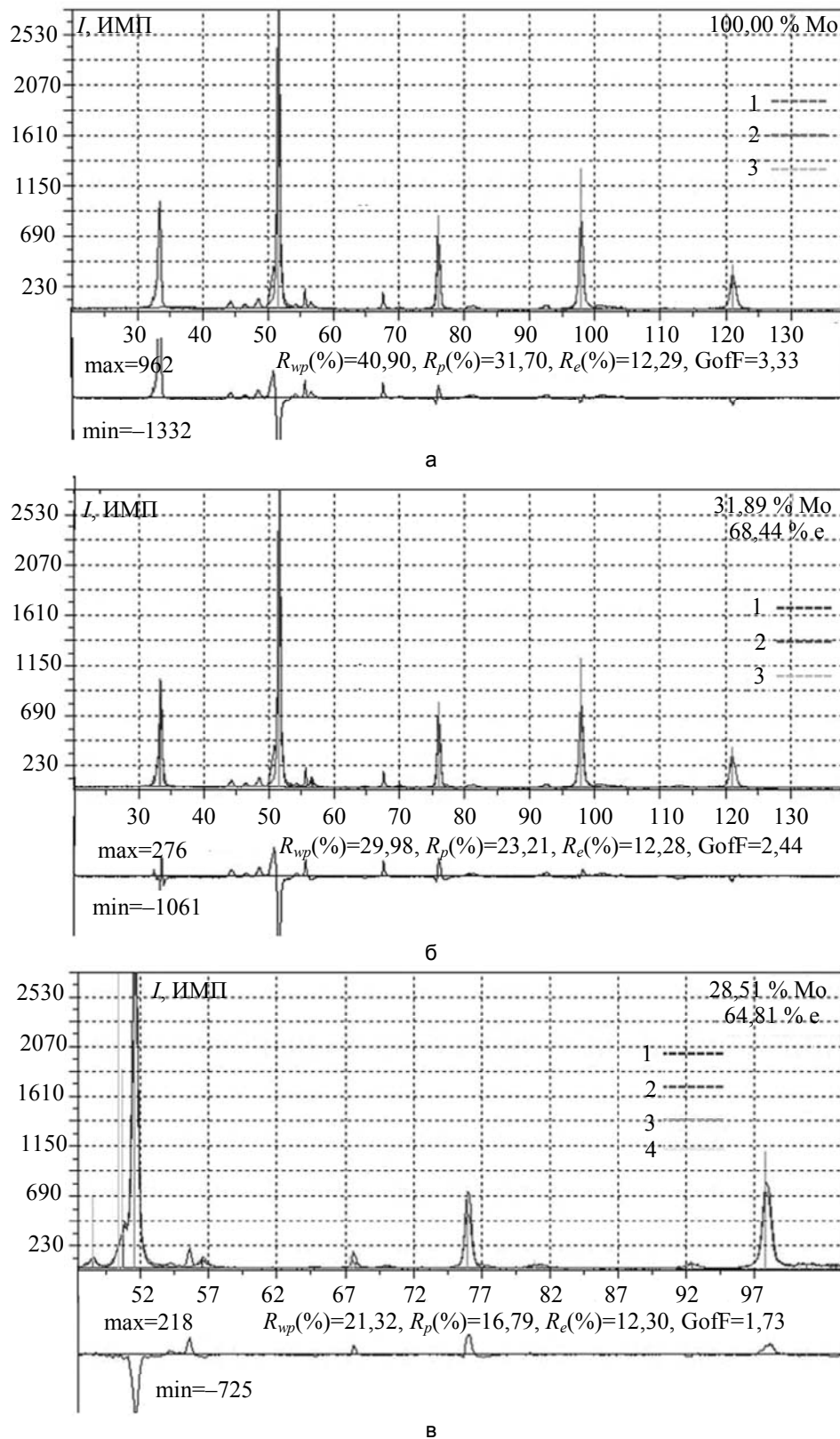


Рис. 6. Расчеты рентнограммы: с учетом только фазы молибдена (а); с учетом фазы молибдена и гексагонального графита (б); расчет рентнограммы с учетом фазы молибдена, гексагонального графита, фаз карбида молибдена (в). 1 – экспериментальная рентнограмма; 2 – расчетная рентнограмма; 3 – отметки фазы молибдена; 4 – отметки фаз карбида молибдена. Под графиками (а), (б), (в) показаны разностные кривые

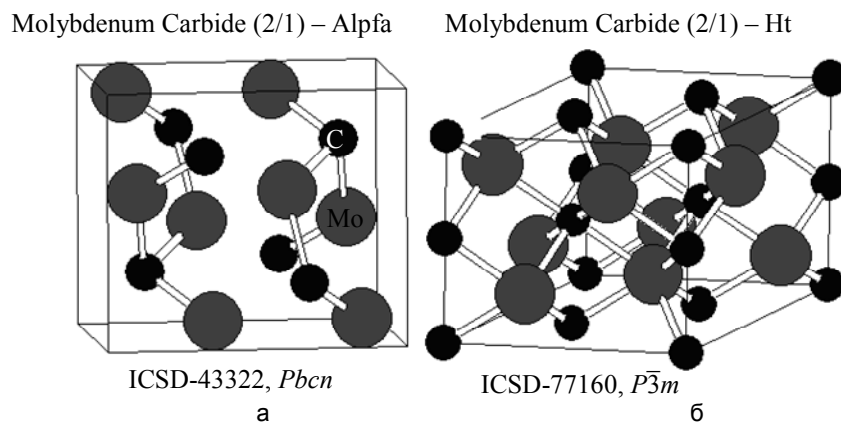


Рис. 7. Расположение атомов в элементарных ячейках карбида молибдена: пространственная группа симметрии $Pbcn$ (а) и пространственная группа симметрии $P\bar{3}m$ (б)

Пространственная группа	$a, \text{Å}$	$b, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	α°	β°	γ°	$V, \text{Å}^3$
$P\bar{3}m$	5,1428(12)	5,1428(12)	4,7137(19)	90	90	120	107,97(1)
$Pbcn$	4,71519(21)	6,01376(10)	5,15889(42)	90	90	90	146,29(4)

Таблица 2. Кристаллографические характеристики карбидов молибдена

Выводы

Проведено сравнение экспериментальных и расчетных рентгенограмм по данным об атомной структуре карбидов молибдена для углеродных покрытий, полученных в импульсном эрозионном разряде. Результат сравнения позволяет предположить, что в матрице аморфной фазы образца, полученного в импульсном режиме, присутствуют кристаллики фуллерита, возможно, легированные молибденом.

Возрастание интенсивности диффузного рассеяния углеродной составляющей (первый диффузный максимум, $2\theta_{Fe}$ от 8° до 40°), по всей вероятности, связано с внедрением молибдена в углеродную матрицу. Сужение второго диффузного максимума ($2\theta_{Fe}$ от 55° до 80°) и его смещение в область больших значений углов рассеяния может быть обусловлено двумя причинами: образованием нанокристаллов карбида молибдена с ориентировкой (102); образованием нанокристаллов сверхплотной кубической фазы углерода C_8 , переходной от графита к алмазу. Изучение формирования металл-углеродных структур в импульсном электроэрозионном разряде методами рентгенографии показало, что сильные линии – это отражение линии (002) графита и линий (110), (200), (211), (220) молибдена (рис. 4). Анализ дифракционных картин показал, что на поверхности молибдена в процессе взаимодействия с углеродом в электроэрозионном разряде образуется пленка карбидов.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012–2016 годы, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, государственных контрактов № 14.740.11.0895, № 14.740.11.0137, № 16.740.11.0562, № 14.740.11.1157, № 14.B37.21.0755, № 14.B37.21.0747, № 14.B37.21.1066, а также в соответствии с государственным заданием Минобрнауки России и заказом Департамента научных и научно-педагогических кадров на оказание услуг № 2.3282.2011 и № 2.2774.2011.

Литература

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 307 с.
2. Агеев Е.В., Семенихин Б.А. Выбор метода получения порошковых материалов из отходов спеченных твердых сплавов // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: Изд-во Самарского науч. центра РАН, 2009. – Спец. вып.: Актуальные проблемы машиностроения. – С. 12–15.
3. Косолапова Т.Я. Карбиды. – М.: Металлургия, 1968. – 300 с.
4. Кушков Х.Б., Карданов А.Л., Адамокова М.Н. Электрохимический синтез двойных карбидов молибдена и вольфрама (Mo, W)2C из вольфраматно-молибданто-карбонатных расплавов // Расплавы. – 2012. – № 4. – С. 65–73.
5. Мальшев В.В., Дуда Т.И., Шевченко В.М. Влияние на коррозионно-электрохимическое поведение титана методом высокотемпературного электрохимического синтеза MO_2C покрытий // Журнал прикладной химии. – 2005. – Т. 78. – № 11. – С. 1872–1874.

6. Бурков П.В. Формирование структуры, фазовый состав и свойства композиционного материала TiC-NiTi в зависимости от содержания углерода в карбиде титана и частичной замене титана молибденом // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2. – Ч. 2. – С. 10–15.
7. Сысун В.И. Электроимпульсные методы обработки материалов: Учебное пособие. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. – 58 с.
8. Патент RUS 107010 11.03.2011. Тихомиров А.А., Сысун В.И. Импульсный генератор для осуществления разряда в воде.

<i>Тихомиров Александр Андреевич</i>	– Петрозаводский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, sasha.82@mail.ru
<i>Сысун Валерий Иванович</i>	– Петрозаводский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, vsysun@psu.karelia.ru
<i>Алешина Людмила Александровна</i>	– Петрозаводский государственный университет, доктор физ.-мат. наук, профессор, aleshina@psu.karelia.ru
<i>Устинов Антон Сергеевич</i>	– Петрозаводский государственный университет, ст. преподаватель, Anton-ustinov@psu.karelia.ru

УДК 53.082.79

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЯДЕРНО-МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА ЖИДКИХ СРЕД

В.В. Давыдов, А.Ю. Карсеев

Разработана конструкция переносного ядерно-магнитного спектрометра, позволяющая проводить измерения времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации жидкой среды в слабом магнитном поле $B_0 = 55$ мТл. Для измерения T_1 в разработанной конструкции спектрометра впервые реализован метод Джулотто в слабом магнитном поле. Этот метод ранее применялся для измерений только в сильных магнитных полях для твердых образцов, в которых соотношение времен релаксации отличаются от жидких сред. Разработана и реализована схема накопления сигнала ядерного магнитного резонанса, что позволило проводить измерения времен релаксации для малого количества жидкой среды (10–15 г) при отношении сигнал/шум около 1,5.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, спектрометр, магнитное поле, время релаксации, схема накопления, мониторинг.

Введение

В настоящее время в нашей стране в условиях непрекращающегося экономического кризиса существует устойчивая тенденция снижения затрат на производство продукции, что мгновенно отражается на ее качестве, а также структурном составе. Незначительные нарушения технологии производства, а также умышленное введение дополнительных ингредиентов в продукцию, которые позволяют сохранить ей цвет и запах, визуально не заметить. Для анализа таких веществ требуется множество приборов и химических компонентов (передвижная мобильная лаборатория), особенно если в роли продукции выступает жидкая среда (например, бензин, молоко или пиво). Так как для каждой жидкой среды требуются свои химические тесты, отслеживать такую продукцию очень сложно по причине огромной стоимости мобильных лабораторий [1, 2]. Кроме того, наблюдается постоянное ухудшение экологического состояния водных объектов. Происходит их загрязнение различными опасными веществами. Чтобы не допустить возникновения опаснейших ситуаций для людей и массовой гибели морских и речных обитателей, необходим постоянный контроль состояния водной поверхности и побережья [3]. Своевременное выявление очагов загрязнения позволяет вовремя провести комплекс мер по очистке как побережья, так и воды, что предотвратит более серьезную экологическую катастрофу.

Необходим постоянный мониторинг состояния водной поверхности и побережья, особенно около крупных городов и промышленных объектов. Для этого используются средства космического наблюдения, воздушная разведка, водное патрулирование с забором проб. Но на побережье расположено множество удаленных от дорог мест, покрытых растительностью (кусты и т.д.), к которым можно добраться только пешком. Аналогичная ситуация распространяется на низины с водой, болота около транспортных магистралей, из которых вытекают мелкие речки, куда часто сбрасывают опасные вещества. В таких условиях мониторинг с воздуха неэффективен. Наиболее объективный контроль – это забор проб вручную. Но возможности такого забора по количеству проб ограничены. Кроме того, оборудование для полного анализа взятых проб (рентгеновские и оптические спектрометры) находится, в основном, в стационарных лабораториях и очень дорого. По этой причине желательно его загружать на исследование образцами, в которых содержатся продукты загрязнения, представляющие опасность. Чтобы сэкономить средства и вовремя успеть принять меры, необходим эффективный экспресс контроль взятых проб на месте. Это и определяет задачу разработки – создать недорогой, простой в обращении, переносной (легкий), универсальный (применимый для большого количества жидкостей) измерительный прибор.

Наиболее перспективной является разработка прибора, работающего на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Основными параметрами любой жидкой среды, по которым можно мгновенно установить изменение ее агрегатного состояния (повышение температуры, появление в ней других веществ, растворенных или нет), являются времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации [1, 4–6]. Ядерно-магнитные спектрометры позволяют бесконтактным методом измерять времена релаксации жидкой среды как в стационарном, так и в проточном состоянии [6–11]. Единственное условие их применения – это наличие в исследуемой среде достаточного количества ядер с магнитными моментами [4, 7, 11]. Особенно эффективно их применение в жидких средах, содержащих ядра водорода, фтора, лития, железа, цинка, хлора, фосфора и т.д. [6, 7, 10]. Почти во всех жидких средах, для тестирования которых будет разрабатываться прибор, есть ядра водорода или вода, обладающие большими магнитными моментами [4, 5, 7, 12]. В связи с этим многофункциональность, а, следовательно, востребованность и конкурентоспособность прибору будут обеспечены.

Постановка задачи

Наибольший вес в измерительную конструкцию ЯМР-спектрометров вносят магнитные системы [1, 6, 7, 13]. Для разработки малогабаритного переносного ЯМР-спектрометра необходимо уменьшить конструкцию магнитной системы, что приведет к уменьшению индукции магнитного поля, в котором наблюдается сигнал ЯМР. Исходя из этого, необходимо разработать новую схему регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле с помощью модуляционной методики для измерения времен продольной T_1 и поперечной T_2 релаксации жидкой среды. Другие методики регистрации сигнала ЯМР в слабых магнитных полях для проведения этих измерений не пригодны, так как дают большие погрешности измерений [6, 7, 14]. Кроме того, требуется разработать методы и новую схему управления, позволяющие одним и тем же измерительным устройством без изменения его конструкции измерять как T_2 , так и T_1 . Измерять две константы релаксации необходимо, так как в случаях воды, спиртосодержащих и кисломолочных жидких сред встречаются варианты их смесей с различными опасными веществами, в которых T_2 такое, как у самой исходной среды в некотором диапазоне температур [11, 12, 15, 16]. Одновременное измерение T_1 и T_2 исключает ошибку в определении состояния жидкой среды. Размеры и вес измерительного прибора с автономным источником питания должны позволять его легко переносить и мобильно размещать для проведения измерений, а также «сворачивать».

Для удобства обработки информации регистрируемый сигнал ЯМР через согласующую схему будет подаваться на вход ноутбука. Для определения времен релаксации и сравнения их с базовыми для данной температуры жидкой среды необходимо разработать соответствующую программу.

Конструкция ЯМР-спектрометра

Для регистрации сигнала ЯМР была разработана и собрана новая малогабаритная конструкция магнитной системы спектрометра на основе двух плоских (прямоугольных) самарий-кобальтовых с примесями платины магнитов, имеющихся в распоряжении авторов настоящей работы, с высокой магнитной энергией, а также необходимыми размерами и весом для изготовления под них компактной «нейтрали». На рис. 1 представлена конструкция магнитной системы. Расстояние между полюсами составляет 12 мм, индукция магнитного поля $B_0 = 55$ мТл, неоднородность 10^{-3} , частота регистрации сигнала ЯМР $f_{\text{ямр}} = 2,31$ МГц, масса конструкции (с катушками модуляции) – 2,326 кг.

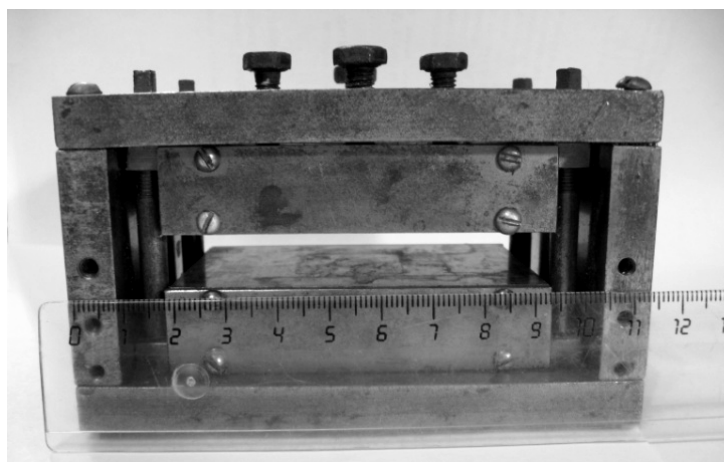


Рис. 1. Внешний вид магнитной системы

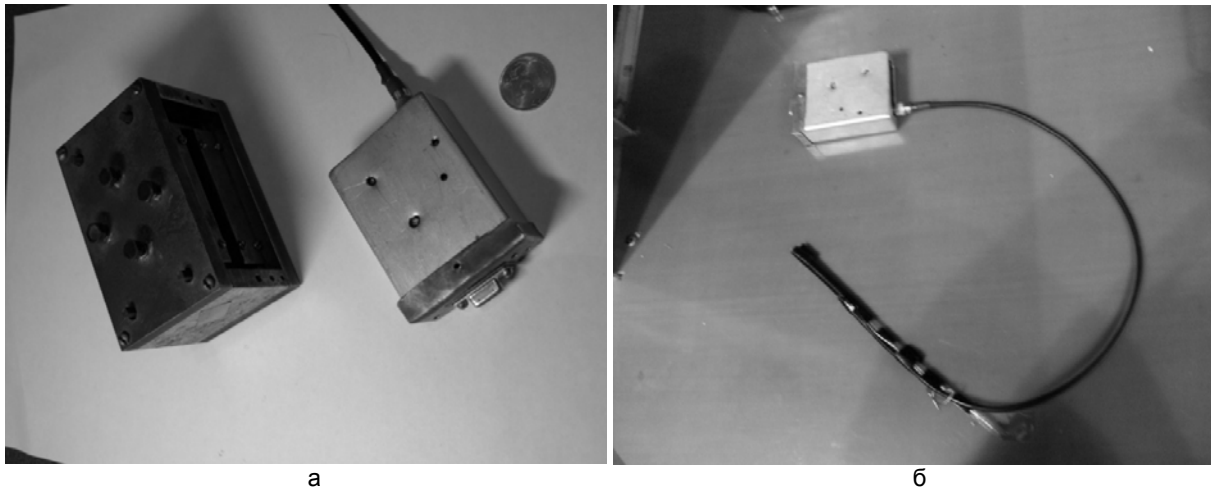


Рис. 2. Внешний вид конструкции: автодин, магнитная система и кюветы (а); автодин с катушкой регистрации и кюветой (б)

Для регистрации сигнала ЯМР в слабом магнитном поле была разработана и собрана новая конструкция генератора слабых колебаний (автодин), позволяющая регистрировать на частоте резонанса отклик жидкой среды на внешнее воздействие на уровне 2–3 мкВ от 10–15 г исследуемого жидкого вещества. На рис. 2, а, представлен внешний вид конструкции автодина в экране рядом с магнитной системой для оценки размеров. На рис. 2, б, представлен автодин с подключенной к нему катушкой регистрации сигнала ЯМР и кюветой для исследуемого вещества (масса этой измерительной части прибора – 0,612 кг). В конструкцию измерительной части прибора также входят аккумулятор со схемой стабилизации питания (+12 В) и схема управления; общая масса этих (не представленных на рис. 2) частей прибора составляет 1,244 кг.

Методы измерения T_1 и T_2

На рис. 3 представлен сигнал ЯМР на выходе автодина. Сигнал ЯМР регистрируется в широкой полосе (10 кГц) с частотой модуляции $f_{\text{мод}} = 50$ Гц. Форма линии регистрируемого сигнала ЯМР при однократном прохождении через резонанс аппроксимируется следующей зависимостью [4, 5, 14]:

$$U_c(t) = U_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(at^2/2),$$

$$a = \gamma \frac{dH_z}{dt} = d\left(\frac{\Delta\omega}{dt}\right),$$

где a – скорость изменения расстройки магнитного поля; T_2^* – эффективное время поперечной релаксации; U_0 – максимальное значение амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР.

Эффективное время поперечной релаксации T_2^* вычисляется по спаду огибающей (пунктирная линия – рис. 3).

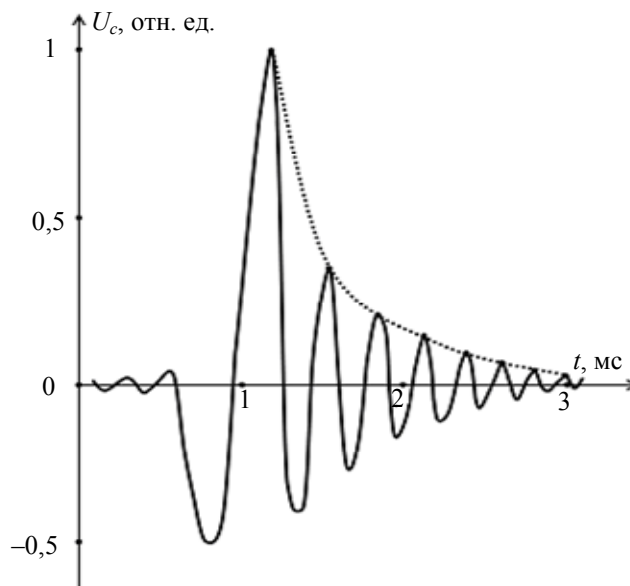


Рис. 3. Форма линии сигнала ЯМР (пунктирная линия – спад огибающей)

Время поперечной релаксации T_2 жидкой среды определяется по формуле [4, 5, 14]

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_2^*} + \frac{\gamma \Delta H}{\pi},$$

где ΔH – неоднородность магнитного поля в зоне размещения катушки регистрации сигнала ЯМР.

В разработанной конструкции для уменьшения влияния неоднородности магнитного поля на результат измерения объем катушки регистрации был минимизирован до $0,15 \text{ см}^3$.

Для измерения времени продольной релаксации T_1 в собранной конструкции спектрометра был впервые реализован метод Джулотто при регистрации сигнала ЯМР от жидкой среды в слабом магнитном поле. Суть метода состоит в следующем. Для системы спинов, удовлетворяющих уравнениям Блоха для трех компонент ядерной намагниченности M стационарного состояния, предположим, что изменение $\Delta\omega$ происходит адиабатически. Тогда в соответствии с [4–6] из решений уравнений Блоха получается сигнал, знак которого зависит от того, каким образом (т.е. со стороны больших или со стороны меньших значений) напряженность поля достигает своей резонансной величины. При периодической модуляции, симметричной относительно $H_0 = f_{\text{ямп}}/\gamma$, амплитуда сигнала ЯМР будет максимальна только в том случае, когда время τ между двумя последовательными прохождением через резонанс велико по сравнению с T_1 . Если это условие не выполняется, то термическое равновесие не успевает восстановиться, и регистрируемые сигналы ЯМР будут уменьшаться в соответствии с [5, 14] следующим образом:

$$M = M_0 \frac{1 - \exp\left(\frac{-\tau}{T_1}\right)}{1 + \exp\left(\frac{-\tau}{T_1}\right)}. \quad (1)$$

Значение M в этой формуле пропорционально амплитуде регистрируемого сигнала ЯМР, а M_0 – начальное значение намагниченности жидкой среды (оно одинаково для любой частоты, так как магнит, в котором находится исследуемая жидкость, не меняется).

Исходя из (1), получается, что можно измерять T_1 двумя разными способами.

1. Измерить амплитуду сигнала ЯМР при двух различных частотах модуляции (для двух различных τ), поделить одно соотношение на другое и графическим методом установить значение T_1 . Для водопроводной воды при температуре $T = 18,5^\circ\text{C}$ время продольной релаксации $T_1 = 1,631 \pm 0,008 \text{ с}$.
2. Измерить величину M_0 (по частоте) без внесения в поле контейнера с исследуемой жидкой средой. Далее для двух различных частот модуляции измеряем величину намагниченности исследуемой жидкой среды (по частоте) и по полученной зависимости (2) для T_1 определяем время продольной релаксации жидкости

$$T_1 = \frac{|\tau_2 - \tau_1|}{\left| \ln \left(\frac{(f_0 - f_1)(f_0 - f_2)}{(f_0 + f_1)(f_0 + f_2)} \right) \right|}. \quad (2)$$

Этим способом было установлено, что для водопроводной воды из крана при температуре $T = 18,5^\circ\text{C}$ время продольной релаксации $T_1 = 1,628 \pm 0,008 \text{ с}$.

Полученные значения T_1 отличаются от базового значения $T_1 = 1,113 \pm 0,012 \text{ с}$ при данной температуре, которое обеспечивает государственное унитарное предприятие «Водоканал». Такое расхождение объясняется большой изношенностью труб в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и наличием по этой причине в воде посторонних элементов и включений. После фильтрации воды кувшином с фильтром Brita были получены следующие значения T_1 (1 способ – $1,125 \pm 0,006 \text{ с}$, 2 способ – $1,129 \pm 0,006 \text{ с}$), что означает, что вода пригодна к употреблению.

Уменьшение размеров катушки регистрации привело к уменьшению количества исследуемого вещества (уменьшению числа ядер с магнитными моментами), что вызвало падение отношения сигнал/шум (SNR). Кроме того, регистрация сигнала ЯМР в слабом магнитном поле также ухудшает SNR. Особенно это стало критичным при проведении измерений T_1 . Для улучшения SNR была разработана и собрана схема накопления сигнала ЯМР. На рис. 4 представлены сигналы ЯМР без накопления и на выходе схемы накопления.

При использовании схемы накопления SNR улучшается в 10 раз при 100 накоплениях по сравнению с режимом регистрации сигнала ЯМР без накопления. После схемы накопления сигнал ЯМР подается на вход ноутбука, в котором по разработанной программе определяются T_1 и T_2 . Так как для измерения используется малый объем жидкости, то его температура через несколько секунд станет равной температуре окружающей среды (еще одно из достоинств разработанного прибора). Зная температуру окружающей среды и сравнив полученные T_1 и T_2 с эталонными, можно мгновенно установить отклонения жидкой среды от естественного состояния.

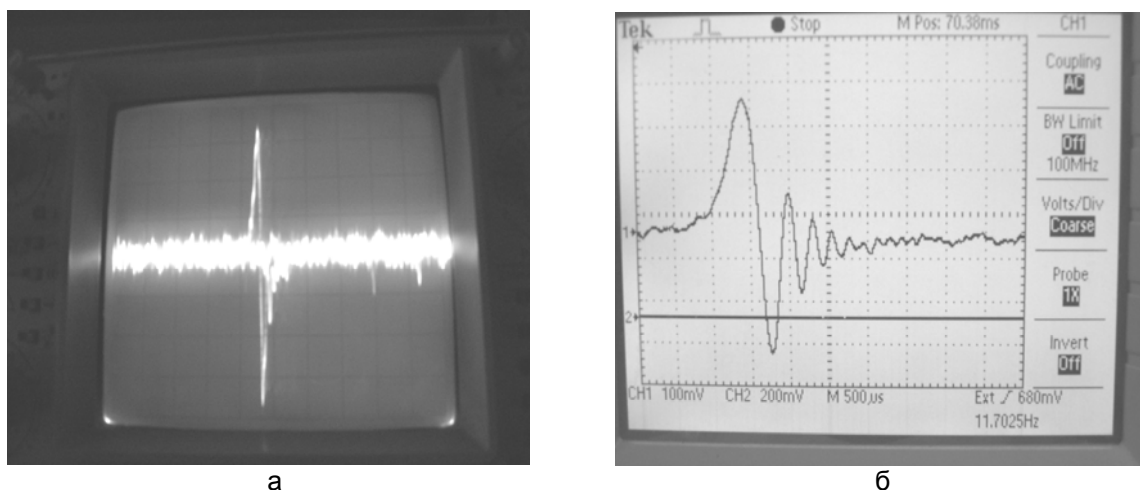


Рис. 4. Регистрируемый сигнал ЯМР: от воды с литием (а); от воды с литием на выходе схемы накопления (б)

Заключение

Собранная и хорошо зарекомендовавшая себя при проведении измерений (с погрешностью не выше 0,5%) констант релаксации жидкой среды в реальном времени малогабаритная конструкция ядерного магнитного резонанса спектрометра еще далека от совершенства, хотя разработанный прибор также не нуждается в предварительной градуировке.

В случае заводского изготовления данных приборов конструкцию магнитной системы можно модернизировать, применив более мощные магнитные материалы с другой конфигурацией полюсов (наиболее интересен вариант в форме круга, который позволяет уменьшить размеры «нейтрали» магнитной системы спектрометра). Кроме того, увеличится величина индукции магнитного поля, в котором регистрируется сигнал ядерного магнитного резонанса, и уменьшится неоднородность. Все это увеличит SNR, а последнее – и число «виглей» (пиков) в линии сигнала ядерного магнитного резонанса (рис. 3), что улучшит точность измерений при уменьшении веса прибора.

Уменьшение размеров магнитной системы позволит компактно разместить в одном корпусе магнитную систему, электронные блоки и источник питания с аккумулятором, располагая между ними экраны, рассеивающие остаточное магнитное от магнитной системы спектрометра. Такая конструкция позволит избежать дополнительных наводок на соединительные кабели и особенно на разъемы. В этом случае в корпусе целесообразно будет расположить стандартный датчик температуры, а для обработки сигнала ядерного магнитного резонанса после схемы накопления разработать электронную схему на основе микроконтроллера со встроенными цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразователями, что позволит передавать информацию о константах релаксации жидкой среды в цифровом коде в ноутбук.

Литература

1. Davydov V.V., Mihin Y.A. Compact nuclear – magnetic spectrometer // Thesis book 8th International forum «ECOBALTICA'2011». – St. Petersburg: SPSTU, 2011. – P. 228–229.
2. Давыдов В.В., Ермак С.В. Квантовый спектроанализатор на радиооптическом резонансе // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 92–95.
3. Davydov V.V., Dudkin V.I., Karseev A.U. The nuclear – magnetic spectrometer for liquid environments analysis express in the conditions of the ecological territory // Thesis book 9th International Forum «ECOBALTICA'2012». – St. Petersburg: SPSTU, 2012. – P. 69–70.
4. Абрагам А. Ядерный магнетизм. – М.: Иностранная литература, 1963. – 646 с.
5. Леше А. Ядерная индукция. – М.: Иностранная литература, 1963. – 684 с.
6. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. – СПб: СПбГПУ, 2012. – 496 с.
7. Жерновой А.И. Ядерно-магнитные расходомеры. – Л.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
8. Жерновой А.И. Ядерно-магнитный расходомер с отметкой в приемной катушке // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 11. – С. 39–43.
9. Жерновой А.И. Определение состава нефтегазовой смеси методом ядерного магнитного резонанса // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 10. – С. 84–86.
10. Кашаев Р.С., Дияров Н.Н. Импульсная спектроскопия ЯМР структурно-динамического анализа нефтяных дисперсных систем. – Казань: Градан, 2002. – 109 с.
11. Davydov V.V. The research of the relaxation times T_1 and T_2 in flow liquid // Journal of Physics B: Atomic, Molecular, and Optical Physics. – 1997. – V. 30. – № 17. – P. 3993–3994.

12. Chen B., Ivanov I., Klein M.L., Parrinello M. Hydrogen bonding in water // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91. – № 21. – P. 2155–2158.
13. Кабардина С.И., Шеффер Н.И. Измерения физических величин. – М.: Бином, 2009. – 152 с.
14. Задель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – СПб: Лань, 2005. – 112 с.
15. Davydov V.V. The calculation of relaxation times T_1 and T_2 for flow liquid // International Journal of Modern Physics (New Jersey, London). – 1998. – V. 7. – № 9. – P. 798–801.
16. Lopez E., Ortiz W., Quintana I.M. Determination of the structure and stability of water clusters using temperature dependent techniques // Chemical Physics Letters. – 1998. – V. 287. – № 3–4. – P. 429–434.

Давыдов Вадим Владимирович – Национальный исследовательский университет – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, Davydov_vadim66@mail.ru

Карсеев Антон Юрьевич – Национальный исследовательский университет – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, студент, antonkarseev@gmail.com

УДК 541.183.2.678

ПОЛИМЕРНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА 12, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ НИКЕЛЯ

Е.С. Шаповал, В.В. Зуев

Разработан метод получения наноразмерных частиц никеля (средний диаметр частиц 20–30 нм), защищенных от окисления тонким слоем углеродного покрытия (1–2 нм). Методом полимеризации *in situ* получены полимерные композиты на основе матрицы полиамида 12, наполненные 0,1–1 вес.% наноразмерными частицами никеля. Показано, что механические свойства полимерных композитов (модуль Юнга, предельная прочность) повышаются на 15–20% по сравнению с немодифицированным полиамидом 12, синтезированным по выбранной методике.

Ключевые слова: наночастицы никеля, полимерные нанокompозиты, механические характеристики нанокompозитов, метод инкапсулирования.

Введение

Изучение синтеза наноразмерных частиц металла представляет большой интерес, поскольку эти частицы могут использоваться для создания катализаторов, оптических, электронных и механических приборов, сред для записи информации и т.д. [1, 2]. Одним из важных направлений исследований является создание инженерных конструкционных материалов, которые могут быть использованы как датчики в различных сенсорных устройствах. Перспективным в этом направлении является получение полимерных композитных материалов, которые сочетают в себе такие свойства, как гибкость, легкая перерабатываемость, прозрачность, и при этом восприимчивы к электромагнитным воздействиям и обладают электропроводностью.

В качестве объекта исследований для получения наночастиц авторами был выбран никель. Никель обладает высокой электропроводностью, является магнитным материалом. Известно, что никель легко получается в виде порошков при действии различных восстановителей в водных растворах [3]. Существуют самые разные методы, позволяющие получить наноразмерный порошок никеля, включая восстановление в водных растворах, золь-гель-технику, термическое разложение никельорганических соединений, высокотемпературное вакуумное испарение и т.д. [4]. Однако общим недостатком получаемых этими методами наночастиц металлического никеля является неустойчивость к окислению (в первую очередь, кислородом воздуха) из-за присущей нанообъектам большой удельной поверхности, что значительно ограничивает их применение. Эту проблему можно решить, создав защитную оболочку вокруг наночастицы (метод инкапсулирования). В качестве такой оболочки можно использовать карбонизированный углерод. Целью настоящей работы является создание метода синтеза наночастиц никеля, покрытых защитным углеродным слоем, синтез и изучение механических свойств полимерных нанокompозитов на основе полиамида 12 (ПА-12), модифицированного этими наполнителями.

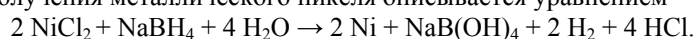
Экспериментальная часть

В качестве метода синтеза наночастиц никеля использовалось восстановление 0,02н раствора хлорида никеля (II) эквинормальным раствором борогидрида натрия в присутствии олеиновой кислоты как сурфактанта при температуре 60°C. Выход металлического порошка, покрытого защитной пленкой олеиновой кислоты, составлял 25–30%. Этот порошок после промывки дистиллированной водой и сушки в вакууме пиролизировался при температуре 600°C в токе инертного газа (аргона). Конечный выход продукта составлял около 15%. Продукт был охарактеризован данными элементного анализа и электронной микроскопии.

Полимерные нанокомпозиты получали методом полимеризации *in situ* в соответствии с методом [5] после смешивания наполнителя и мономера. Модуль Юнга и предел прочности определяли на разрывной машине UTS 10 (UTStestsysteme, Германия) при сжатии для образцов цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 20 мм в интервале нагрузок от 0,1 Н до 20 кН при скорости сжатия 1 мм/мин. Все измерения проводились для серий из не менее чем 5 образцов, полученных при разных синтезах нанокомпозитов.

Результаты и их обсуждение

Наиболее доступным методом синтеза нанодисперсных порошков металлического никеля является восстановление водных растворов солей никеля борогидридом натрия, при этом реакция восстановления наиболее легко осуществляется в растворах с высоким значением pH 12–14, т.е. в щелочной среде [3]. В то же время необходимость создания защитной оболочки вокруг частиц наноникеля заставляет проводить реакцию при низких значениях pH < 7, так как оптимальный путь создания защитной оболочки подразумевает использование таких сурфактантов, как длинноцепочечные органические кислоты, которые формируют гидрофобный слой вокруг металлической частицы (рис. 1, а), препятствуя тем самым ее дальнейшему росту (от наноразмеров) и коагуляции полученных частиц. В этих условиях реакция получения металлического никеля описывается уравнением



В соответствии с уравнением по мере протекания реакции кислотность среды возрастает, что приводит к сравнительно невысоким выходам продукта (около 30%). Выделенные частицы подвергались пиролизу в токе инертного газа, что привело к получению наночастиц никеля размером 20–30 нм, покрытых углеродным слоем толщиной 1–2 нм (рис. 1, б). Углеродный слой представляет собой смесь графитизированного и аморфного углерода [6].

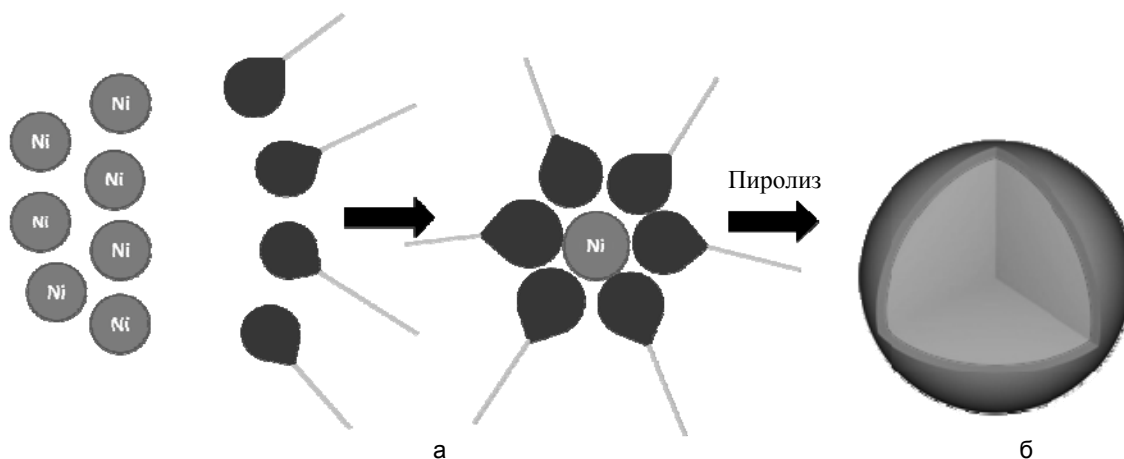


Рис. 1. Схема получения наночастиц никеля: образование защитной оболочки с помощью органической кислоты (а); частица после пиролиза, покрытая углеродным слоем (б)

В качестве термопластичной матрицы авторами был выбран ПА-12 – полимер, широко применяемый для изготовления различных деталей, включая подшипники скольжения. Оптимальным способом получения нанокомпозитов является полимеризация *in situ* (рис. 2) [7], так как другие методы их создания связаны с трудно преодолимыми проблемами агрегации частиц наполнителя, что затрудняет их равномерное распределение в полимерной матрице. Наличие защитного углеродного слоя обеспечивает решение двух задач – улучшает совместимость наночастиц с полимерной матрицей и предохраняет частицы от разрушения в процессе синтеза (так как в качестве катализатора используется фосфорная кислота).

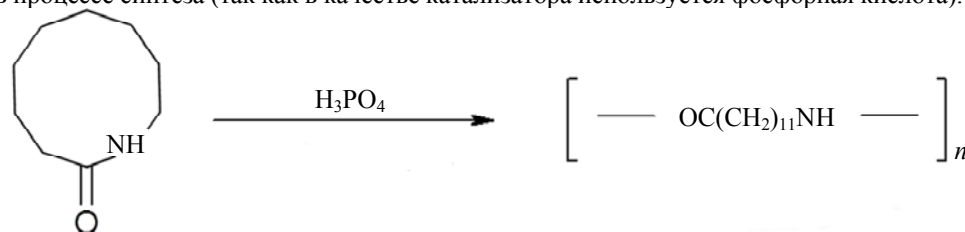


Рис. 2. Схема получения полимерных нанокомпозитов

В результате был получен набор полимерных композитов со степенями наполнения 0,1–1 мас.%. Авторами были исследованы механические свойства полученных композитов. На рис. 3 представлены кривые сжатия.

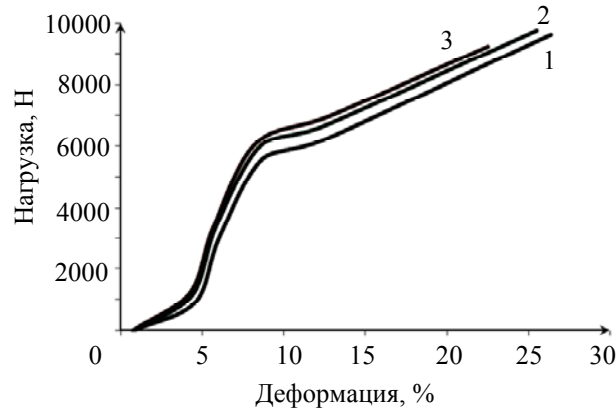


Рис. 3. Кривые сжатия ненаполненного ПА-12 (1); содержащего 0,1 мас.% Ni@C (2); содержащего 1 мас.% Ni@C (3)

Таким образом, введение наночастиц никеля приводит к заметному росту прочностных характеристик полимерных композитов. Это подтверждают и концентрационные зависимости прочностных характеристик (рис. 4–6).

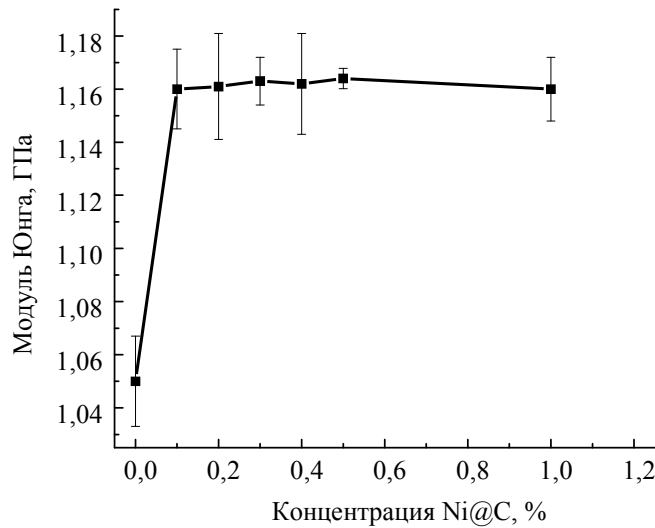


Рис. 4. Зависимость модуля Юнга полимерных композитов от содержания Ni@C

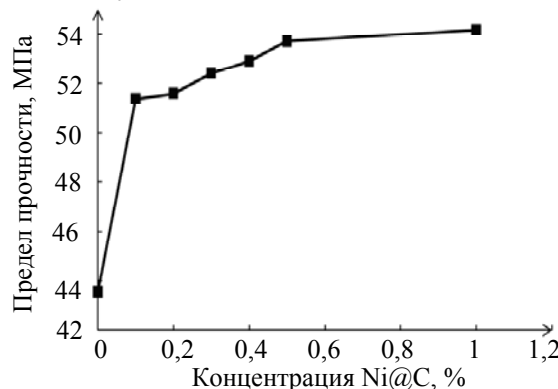


Рис. 5. Зависимость предельной прочности полимерных композитов от содержания Ni@C

Как видно из приведенных графиков, введение наночастиц приводит к росту механических характеристик нанокompозитов примерно на 15–20% по сравнению с ненаполненным полимером, синтезированным в аналогичных условиях. При этом степень усиления ПА-12 практически не зависит от концентрации. Аналогичный эффект наблюдался авторами при получении нанокompозитов на основе ПА-6, усиленных такими наночастицами, как фуллерен C₆₀ [8]. Таким образом, наличие поверхностного углеродного слоя приводит к тому, что поведение наночастиц одинакового размера при введении в полимерный материал оказывается одинаковым. Это говорит о том, что поверхностный слой и размер полностью определяют действие наполнителей, что открывает широкие перспективы для выбранного метода моди-

фикации металлических частиц. Важным с экономической точки зрения является то, что даже при низких степенях наполнения достигается предельное усиление механических свойств. При этом следует отметить, что рост механических характеристик композитов не приводит к потере их пластических свойств.

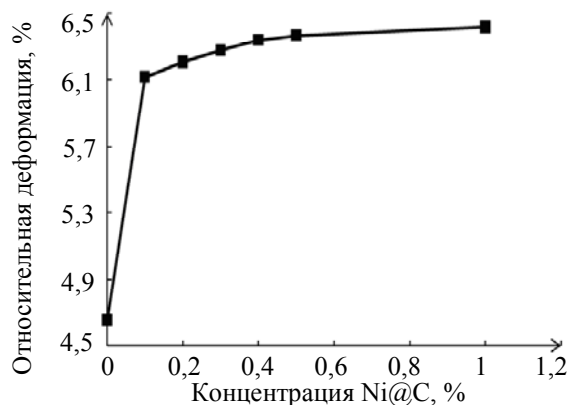


Рис. 6. Зависимость предельной деформации полимерных композитов от содержания Ni@C

Заключение

В результате выполненных исследований был разработан метод синтеза наночастиц никеля Ni@C с размерами частиц 20–30 нм, покрытых защитным слоем углерода толщиной 1–2 нм. Далее были получены нанокомпозиты на основе матрицы ПА-12, усиленные наночастицами Ni@C со степенью наполнения 0,1–1мас.%. Экспериментально подтверждено, что введение наночастиц никеля приводит к росту механических характеристик (модуль Юнга, предельная прочность) композитов на 15–20%.

Литература

1. Помогайло А.Д., Роземберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. – М.: Наука, 2000. – 526 с.
2. Зуев В.В., Пихуров Д.В. Трибологические свойства полимерных нанокомпозитов, модифицированных фуллероидными материалами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 97–100.
3. Свиридов В.В., Воробьева Т.Н., Гаевская Т.В., Степанова Л.И. Химическое осаждение металлов из водных растворов. – Минск: Изд-во. Минского ун-та, 1987. – 256 с.
4. Chen D.-H., Wu S.-H. Synthesis of nickel nanoparticles in water-in-oil microemulsions // Chem. Mater. – 2000. – V. 12. – № 4. – P. 1354–1360.
5. Зуев В.В., Костромин С.В., Шлыков А.В. Механика полимерных нанокомпозитов, модифицированных фуллероидными наполнителями // Высокомолекулярные соединения. – 2010. – Т. 52. – № 5. – С. 815–819.
6. Jacob D.S, Genish I, Klein L., Gedanken A. Carbon-coated core shell structured copper and nickel nanoparticles synthesized in an ionic liquid // J. Phys. Chem. B. Lett. – 2006. – V. 110. – № 21. – P. 17711–17714.
7. Schaefer D.W., Justice R.S. How nano are nanocomposites // Macromolecules-2007. – V. 40. – № 24. – P. 8501–8517.
8. Зуев В.В., Иванова Ю.Г. Полимерные нанокомпозиты на основе полиамида 6, модифицированного фуллероидными наполнителями // Высокомолекулярные соединения. – 2011. – Т. 53. – № 5. – С. 733–738.

Шаповал Екатерина Сергеевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, katenka-sharoval@yandex.ru

Зуев Вячеслав Викторович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, zuev@hq.macro.ru

УДК 544.41:544.344

КИНЕТИКА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ АНИЛИНА. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РОСТА НАНОСТРУКТУРЫ ПОЛИАНИЛИНА

А.В. Подшивалов, В.В. Зуев, С.В. Бронников

Кинетика реакции окислительной полимеризации анилина впервые изучена прямым методом, включающим электронную микроскопию с последующим статистическим анализом микрофотографий образовавшейся гранулированной наноструктуры полианилина в различные промежутки времени и аналитическое описание гистограмм размера гранул полианилина с использованием термодинамической модели агрегации. Показаны зависимости среднего размера гранул и количества гранул от времени полимеризации. Установлено существование трех стадий процесса: образование и рост первичных гранул – в первые три минуты реакции на подложке образуются первичные гранулы и наблюдается их рост; образование монослоя гранул – на третьей минуте гранулы вырастают до максимальных размеров, образуя сплошную пленку полианилина; образование новых гранул на монослое – с четвертой минуты на сформировавшемся монослое образуются новые гранулы.

Ключевые слова: полианилин, кинетика окислительной полимеризации, топохимическая реакция, морфология, статистический анализ, термодинамика необратимых процессов.

Введение

Полианилин (ПАНИ) является одним из наиболее востребованных проводящих полимеров вследствие простоты его синтеза и экологической стабильности. В настоящее время ПАНИ применяется для изготовления многих высокотехнологичных устройств, включая электроды для точной электроники, химические датчики, электроды для светодиодов, конденсаторы и батареи [1]. Свойства этих устройств чувствительны к форме частиц ПАНИ и его молекулярной массе, которые задаются условиями синтеза. В связи с этим исследование кинетики окислительной полимеризации анилина является необходимым условием для понимания свойств, морфологии и спектра применения ПАНИ.

Целью настоящей работы является изучение кинетики окислительной полимеризации анилина методом электронной микроскопии с применением статистического анализа и последующим аналитическим описанием гистограмм размера гранул ПАНИ с использованием модели агрегации [2], описывающей эволюцию микроструктуры в рамках термодинамики необратимых процессов. Модель была успешно применена ранее для описания ансамблей частиц минорной фазы в смеси полиэтилен низкой плотности/полиамид-6 (ПЭНП/ПА-6) с органически модифицированной глиной [3], ансамблей полиуретановых микрокапсул, содержащих каланговое масло [4], и многих других систем.

Экспериментальная часть

В настоящей работе реализован наиболее распространенный метод синтеза ПАНИ с использованием сильного окислителя (пероксисульфат аммония) и высокой концентрацией анилина при высоком уровне кислотности ($\text{pH} < 2,5$). Свежеприготовленный раствор сульфата анилина (0,2 М) и раствор пероксисульфата аммония (0,25 М) сливали в стеклянной чашке при температуре 20°C без перемешивания. Затем ПАНИ осаждали на предметных стеклах 3×2 см в виде пленки.

С использованием сканирующего электронного микроскопа Supra 55 VP (Carl Zeiss, Германия) были получены электронные микрофотографии, регистрирующие процесс полимеризации с течением времени. Полученные фотографии были подвергнуты сегментации и последующему статистическому анализу с использованием программного обеспечения UTHSCSA Image Tool 3.0, в результате чего были получены гистограммы размера гранул ПАНИ. Затем гистограммы были описаны с использованием алгоритма, построенного на основании уравнений модели агрегации [2].

В основе модели агрегации лежат принципы термодинамики необратимых процессов, используемые для описания эволюции микроструктуры, которая в каждый момент времени рассматривается как последовательность ограниченных квазиравновесных состояний. В рамках модели статистическое распределение размера гранул ПАНИ $h(s)$ имеет следующий вид [2]:

$$h(s) = \sum_i^{i=N} a_i s_i^2 \exp\left(-\frac{s_i \Delta u_{0i}}{kT}\right), \quad (1)$$

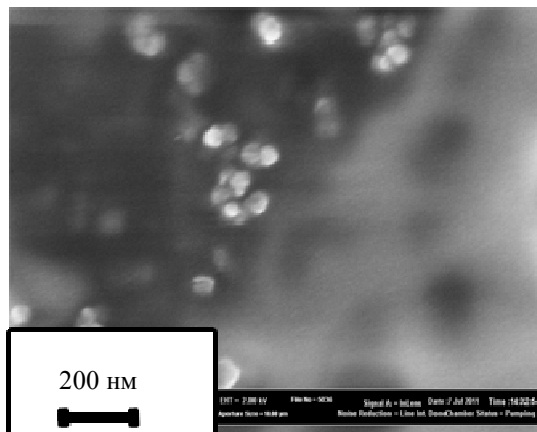
где a_i – нормировочный параметр; s_i – площадь гранул в i -м ансамбле; Δu_{0i} – энергия агрегации i -го ансамбля; T – абсолютная температура; N – количество статистических ансамблей; i – номер статистического ансамбля. Использование уравнения (1) позволяет определить средний размер гранул $\langle s_i \rangle$ как нормированное математическое ожидание Ms_i :

$$\langle s_i \rangle = Ms_i = \frac{\int_0^{\infty} s_i h(s_i) ds}{\int_0^{\infty} h(s_i) ds} = \frac{3kT}{\Delta u_{0i}}. \quad (2)$$

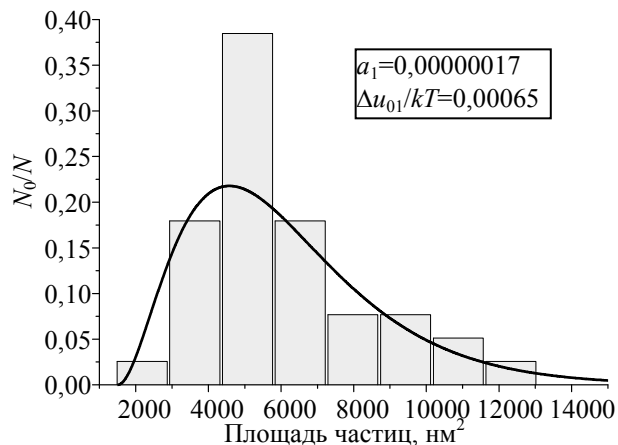
Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии гранул ПАНИ, осевших на предметном стекле в течение 8 мин реакции, и соответствующие им статистические распределения размера гранул, описанные с использованием уравнений модели агрегации [2].

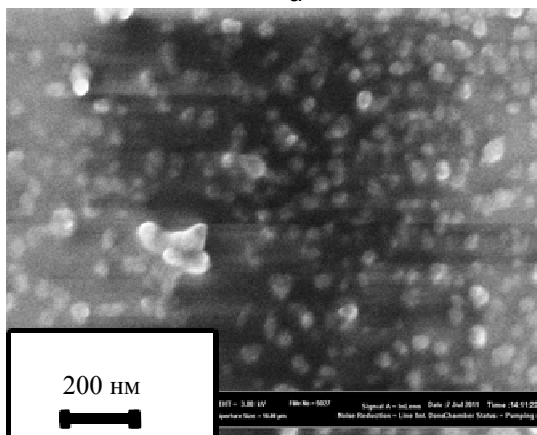
Для описания статистических распределений, приведенных на рис. 1, з, и, успешно использована мономодальная версия уравнения модели агрегации (уравнение (1), $N = 1$). Однако статистическое распределение на рис. 1, к, при $t = 3$ мин удалось адекватно описать уравнением (1) лишь при значении $N = 2$, что говорит о наличии двух статистических ансамблей гранул на этой стадии полимеризации. На рис. 1, к, тонкие линии показывают индивидуальные распределения, а толстая линия – суммарное распределение. Статистические распределения на рис. 1, л–о, были успешно аналитически описаны с использованием мономодального уравнения (уравнение (1), $N = 1$), что говорит о существовании лишь одного статистического ансамбля гранул в интервале 4–8 мин процесса полимеризации.



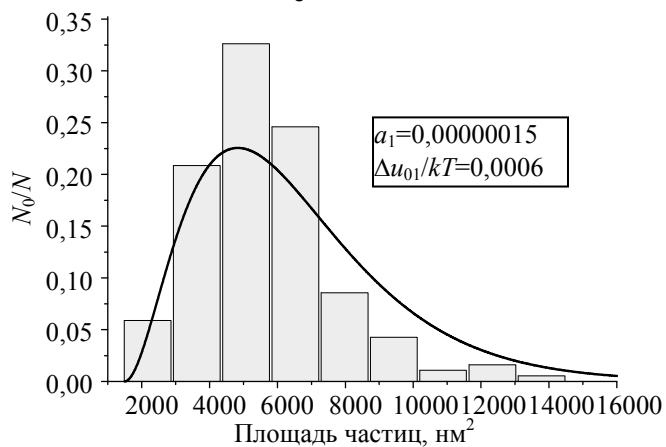
а



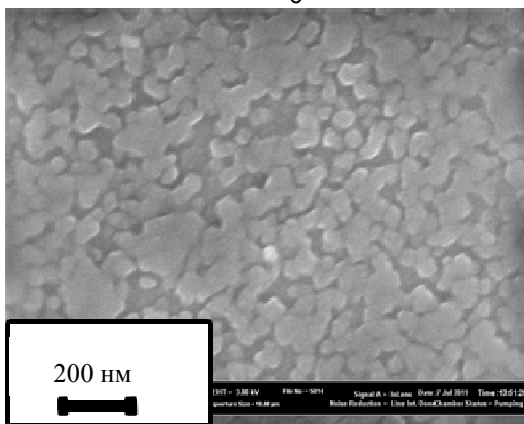
з



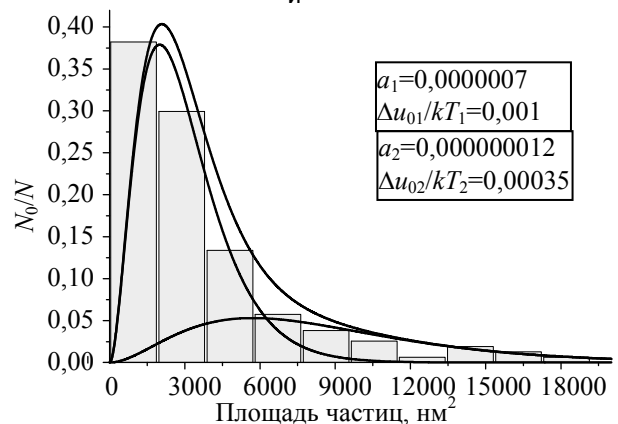
б



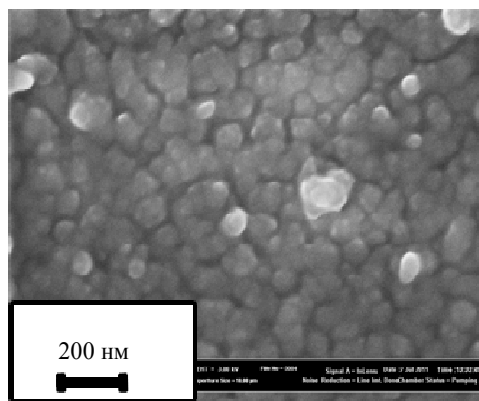
и



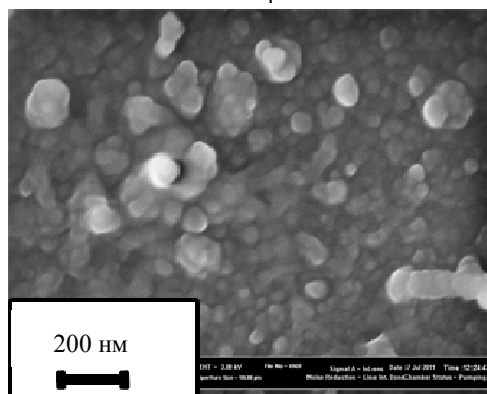
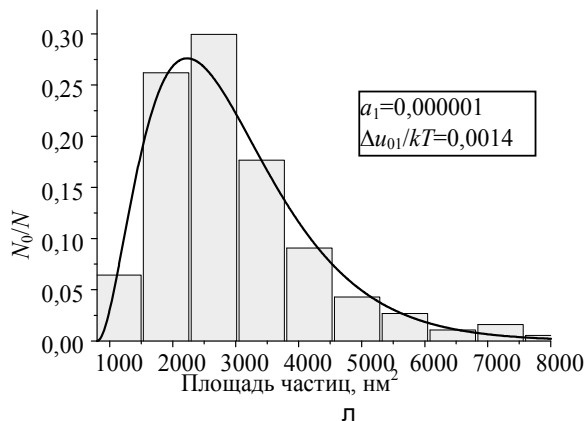
в



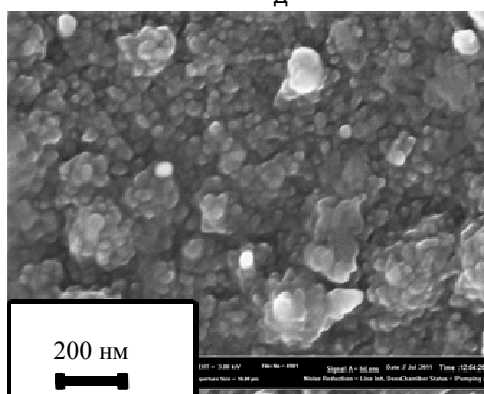
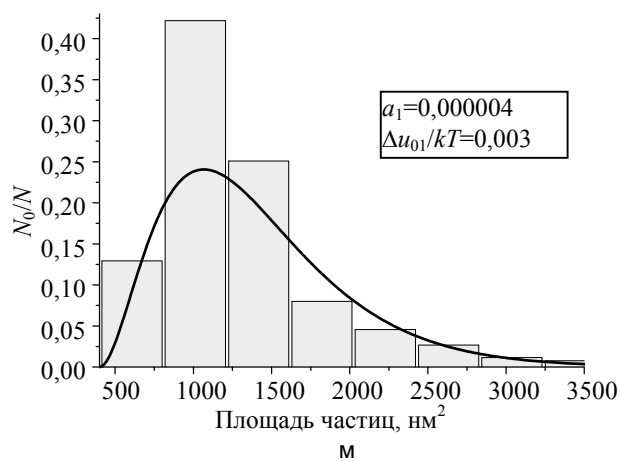
к



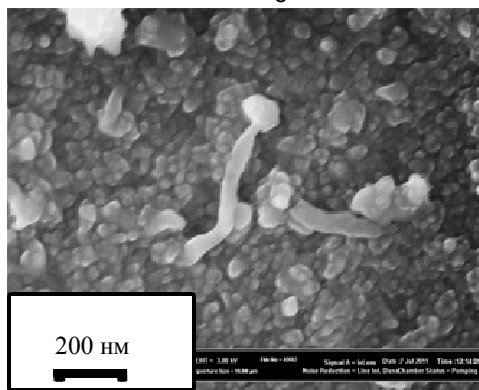
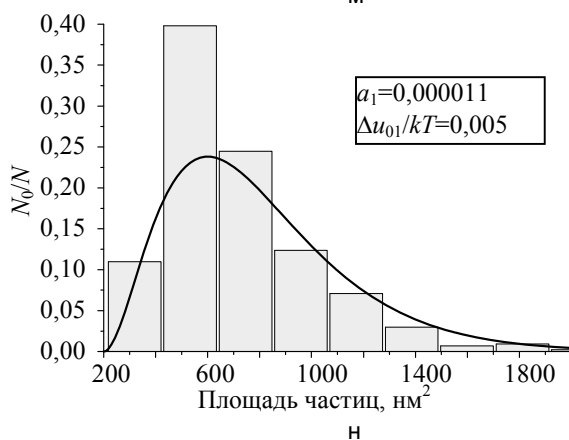
г



д



е



ж

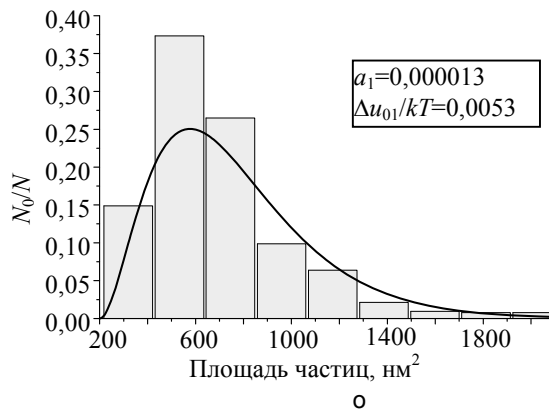


Рис. 1. Микрофотографии гранул ПАНИ (а–ж), осевших в течение 8 мин реакции окислительной полимеризации анилина, и соответствующие им статистические распределения размера гранул ПАНИ (з–о), аналитически описанные с использованием уравнения (1)

Аналитическое описание гистограмм размера гранул ПАНИ и визуальный анализ микрофотографий показывают, что в начале реакции (1 мин) на предметном стекле образуются первичные гранулы ПАНИ, далее количество и размер этих гранул увеличивается (2 мин), и, наконец, гранулы, достигнув максимального размера, образуют плотно упакованную гранулированную пленку или монослой ПАНИ (3 мин). Затем в промежутке времени 3–8 мин количество гранул сильно возрастает, а их размер уменьшается, что свидетельствует об образовании новых гранул непосредственно на монослое гранул, образовавшемся в течение первых трех минут реакции. Обнаруженная закономерность отражается на зависимости среднего размера гранул от времени полимеризации (рис. 2).

Рис. 2 демонстрирует зависимость среднего размера гранул ПАНИ, вычисленного с использованием уравнения (2), от времени полимеризации. Эта зависимость показывает, что процесс окислительной полимеризации анилина состоит из трех стадий:

1. образование и рост первичных гранул (0–2 мин);
2. образование монослоя ПАНИ (2–3 мин);
3. образование новых гранул на монослое (3–8 мин).

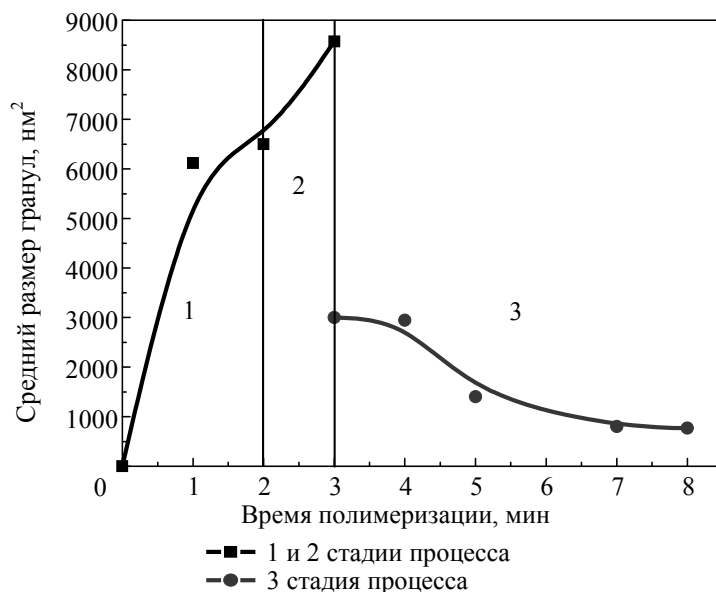


Рис. 2. Средний размер гранул ПАНИ в зависимости от времени полимеризации и топохимические стадии процесса

Рис. 3 отражает зависимость количества гранул ПАНИ на микрофотографиях от времени полимеризации, которая также демонстрирует наличие трех стадий процесса. На 1-й стадии (0–2 мин) образуются первичные гранулы – количество гранул возрастает, однако на 2-й стадии (2–3 мин) образование новых гранул прекращается. Учитывая то, что на этой стадии средний размер гранул достигает максимального значения, также можно судить об образовании монослоя из растущих гранул, осевших ранее. Затем на 3-й стадии процесса (3–8 мин) количество гранул постепенно возрастает, что подтверждает образование новых гранул непосредственно на монослое.

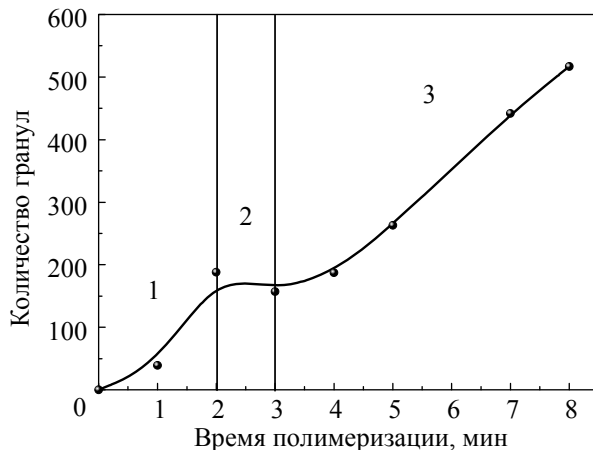


Рис. 3. Количество гранул ПАНИ в зависимости от времени полимеризации и топохимические стадии процесса

Обнаруженные закономерности свидетельствуют о топахимической природе реакции образования олигомеров анилина, которые, в свою очередь, становятся центрами инициации роста новых гранул ПАНИ (3–8 мин) на монослое, образовавшемся в промежутке 0–3 мин.

Заключение

Изучена кинетика окислительной полимеризации анилина методом сканирующей электронной микроскопии с последующим статистическим анализом и кинетическим описанием с использованием уравнений модели обратимой агрегации. Установлено, что синтез полианилина данным методом может быть описан как топахимический процесс. Это позволило сделать вывод о существовании трех фаз процесса: образование и рост первичных гранул, образование монослоя полианилина и образование новых гранул на монослое.

Литература

1. MacDiarmid Alan G. «Synthetic Metals»: A Novel Role for Organic Polymers (Nobel Lecture) // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2001. – № 40. – P. 2581–2601.
2. Kilian H.-G., Bronnikov S., Sukhanova T. Transformations of the micro-domain structure of polyimide films during thermally induced chemical conversion: characterization via thermodynamics of irreversible processes // *J. Phys. Chem. B.* – 2003. – V. 107. – № 49. – P. 13575–13582.
3. Подшивалов А.В., Зуев В.В., Бронников С.В. Термодинамический анализ процессов образования двухкомпонентных полимерных смесей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* – 2012. – № 3 (79). – С. 114–118.
4. Podshivalov A.V., Zuev V.V., Bronnikov S.V., Jiamrungraksa T., Charuchinda S. Synthesis and characterization of polyurethane-urea microcapsules containing galangal essential oil. The statistical analysis of encapsulation // *J. Microencapsul.* – 2013. – № 2 (30). – P. 198–203.

- Подшивалов Александр Валерьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, podshivalov2005@mail.ru
- Зуев Вячеслав Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, zuev@hq.macro.ru
- Бронников Сергей Васильевич** – Институт высокомолекулярных соединений РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, sergei_bronnikov@yahoo.com

УДК 504.054:528.8:528.854:574.3:574.524

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СЕНСОРА LANDSAT 5 (TM) ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОБЩЕГО ФОСФОРА В РЕКЕ ЛУГА, ФИНСКИЙ ЗАЛИВ

Е.Г. Капралов, Е.П. Кунаева, М.А. Кустикова, М.Б. Медник

Фосфор, поступающий со стоками рек, является основным биогенным элементом, вызывающим антропогенную эвтрофикацию природных водных экосистем Финского залива. Дистанционное зондирование с использованием данных сенсора Landsat 5 (TM) дает широкие возможности по определению степени эвтрофикации и дальнейшего пространственно-временного анализа состояния акватории Финского залива. Метод впервые был описан и применен для изучения рек в Китае, позднее адаптирован для рек, впадающих в Балтийское море на территории Швеции. Результаты данной работы показали, что прозрачность и концентрация хлорофилла-а, смоделированные по данным дистанционного зондирования, в состоянии объяснить 62% изменчивости содержания общего фосфора.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, Landsat 5 (TM), общий фосфор, хлорофилл-а, эвтрофикация, Финский залив, река Луга.

Введение

Широкое использование азота (N) и фосфора (P) в последние десятилетия привело к нарушению естественного круговорота этих веществ [1], их концентрация увеличилась по всему миру [2]. В ряде случаев фосфор является лимитирующим фактором роста фитопланктона, что может привести к эвтрофикации водоема [3]. В других случаях лимитирующим фактором может являться азот [2, 4].

Настоящая работа посвящена определению уровня общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), так как именно он (до 49% $P_{\text{общ}}$) переносится в растворенном виде и поступает в Балтийское море с речным стоком [5]. Исследование основано на методе, разработанном Wu и др. [6]. В данном методе предлагается использовать данные сенсора Landsat 5 (TM) для определения отношения количества поступившего на объект света и количества отраженного им света (Reflectance), расчета показателей хлорофилла-а (*Chl-a*), прозрачности (диск Секки) и сопоставления этих значений с данными гидрохимического мониторинга общего фосфора

для исследуемого участка акватории [6]. В работе рассматривается возможность применения данного метода в регионе Финского залива (рис. 1).

При подготовке работы использованы следующие материалы и программные средства:

1. данные гидрохимического мониторинга содержания общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), предоставленные СПб ООО «Экология и бизнес» (<http://www.helcom.ru>);
2. данные дистанционного зондирования сенсора Landsat 5 (TM) из коллекции Геологической службы США (<http://www.usgs.gov>);
3. программное обеспечение ENVI™, ERDAS™, Image Processor™, ScanMagic®, предоставленное Ресурсным центром космических и геоинформационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета (<http://sgt.spbu.ru>).

Методы и данные дистанционного зондирования, используемые для определения концентрации фосфора и хлорофилла-а

Избыток питательных веществ в водоеме приводит к быстрому росту фитопланктона, который, в свою очередь, приводит к снижению прозрачности воды. Этот эффект дает возможность оптически измерить изменение прозрачности с помощью данных сенсора Landsat 5 (TM) (табл. 1) [7].

Номер канала	Длина волны, мкм	Разрешающая способность, м
1	0,45–0,52	30
2	0,52–0,60	30
3	0,63–0,69	30
4	0,76–0,90	30
5	1,55–1,75	30
6	10,4–12,5	120
7	2,08–2,35	30

Таблица 1. Каналы сенсора Landsat 5 (TM), Геологическая служба США (2013)

Существует ряд исследований по организации измерений изменения прозрачности методами дистанционного зондирования [8–11].

Исследования показывают, что соотношение каналов TM1/TM3 сенсора Landsat 5 (TM) может давать хорошие результаты по оценке прозрачности воды. Существуют также исследования, которые указывают, что канал TM1 сенсора Landsat 5 (TM) может быть хорошим прогностическим параметром для расчета прозрачности [6].

Концентрация *Chl-a* является широко применяемым показателем оценки распространения биомассы фитопланктона в водоеме [12]. Она часто используется в области дистанционного зондирования для определения качества воды, поскольку отображает оптические изменения на поверхности и может быть определена количественно при помощи оптических датчиков, таких как Landsat 5 (TM).

Содержание в водоеме *Chl-a* может быть оценено с помощью соотношения каналов TM2/TM3 сенсора Landsat 5 (TM) [9]. *Chl-a* имеет сильную линейную зависимость от уровня содержания общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), так как интенсивность роста фитопланктона зависит от содержания фосфора и азота [6]. Причиной оптического изменения параметров водной среды является процесс фотосинтеза, происходящего внутри фитопланктона, который, в свою очередь, содержит *Chl-a* [13, 14]. Поскольку непосредственно уровень фосфора не может быть измерен оптически при помощи дистанционного зондирования, это исследование основано на косвенных переменных.

Разница между датами выполнения гидрохимического мониторинга и спутниковыми данными (табл. 2) непосредственно оказывает влияние на результаты. Но исследования, описанные в работе Kloiber и др. [15], указывают на то, что разница в семь дней все еще дает достаточно точные показатели.

Мутность воды также влияет на изменение оптических показателей, что может вызвать нежелательное отражение и рассеяние [16].

В работе использован метод, разработанный Wu и др. [6], который описывает возможность использования спутниковых данных, полученных с сенсора Landsat 5 (TM), для количественного расчета показателей $P_{\text{общ}}$ на примере реки Quintang (Китай), и работа Andersson [17], в которой метод, описанный в статье Wu и др. [6], применялся для расчета показателей $P_{\text{общ}}$ для рек на территории Швеции (Norrstrom, Dalalven, Gavlean), впадающих в Балтийское море.

Результаты предполагают, что расчет прозрачности, *Chl-a* и значения канала TM1 сенсора Landsat 5 (TM) может описывать уровень содержания $P_{\text{общ}}$ в реках. Этот метод использует соотношение каналов TM1/TM3, TM3/TM2 и канала TM1 (табл. 1) сенсора Landsat 5 (TM). Данные гидрохимического мониторинга содержания $P_{\text{общ}}$, предоставленные СПб ООО «Экология и бизнес», используются в качестве зависимой переменной. Значения и коэффициенты, полученные с сенсора Landsat 5 (TM) для соотношения каналов TM1/TM3, TM3/TM2 и канала TM1 (рис. 2–4), устанавливаются в качестве независимых

переменных регрессии. Полученная регрессионная модель показателей соотношения каналов TM1/TM3, TM3/TM2 и канала TM1 (рис. 2–4) сенсора Landsat 5 (TM) и данные гидрохимического мониторинга содержания $P_{\text{общ}}$ (табл. 3) используются в качестве исходных данных модели для определения расчетных значений $P_{\text{общ}}$.

№	Идентификатор	Дата (год-месяц-день)	Среднее время по Гринвичу (часы-минуты-секунды)
1	LT51860182003210MTI01	2003-07-29	08:53:58
2	LT51850182003251MTI01	2003-09-08	08:48:31
3	LT51850182006163KIS02	2006-06-12	09:03:38
4	LT51850182006195KIS01	2006-07-14	09:04:09
5	LT51860182006218KIS02	2006-08-06	09:10:37
6	LT51850182007118MOR00	2007-04-28	09:05:47
7	LT51860182007141MOR00	2007-05-21	09:11:43
8	LT51860182007173MOR00	2007-06-22	09:11:14
9	LT51850182007198MOR00	2007-07-17	09:04:47
10	LT51860182007221MOR00	2007-08-09	09:10:43

Таблица 2. Сцены Landsat 5 (TM), использованные при расчетах. Коллекция Геологической службы США (2013)

Исследуемый район расположен в восточной части Балтийского моря (рис. 1). Эта зона соответствует траектории 185–186, строке 18 спутника Landsat 5 (сенсор TM), используемого в этом исследовании.

Район исследований был выбран на основе расположения измерительных станций (рис. 1), данные с которых были предоставлены СПб ОО «Экология и бизнес». Площадь исследуемого участка выбрана на основе работ Allen и др. [18], где показано, что точность этого вида измерений составляет девять пикселей, причем с увеличением покрытия показатели остаются относительно постоянными. Исследуемые участки размещены в середине потока, чтобы избежать смешанных пикселей [19].

Табл. 2 показывает, какие именно сцены сенсора Landsat 5 (TM) были использованы для построения модели. В тех случаях, когда область не была отобрана, причиной являлось наличие облачности над выбранным районом или отсутствие данных гидрохимического мониторинга (табл. 3) за исследуемый период [20, 21].

№	Дата сцены Landsat 5 (TM) (год-месяц-день)	Дата отбора пробы (год-месяц-день)	Содержания общего фосфора ($P_{\text{общ}}$), мг/л
1	2003-07-29	2003-06-19	0,04
		2003-07-25	0,04
		2003-08-18	0,05
2	2003-09-08	2003-08-18	0,05
		2003-10-21	0,04
3	2006-06-12	2006-05-06	0,045
		2006-06-05	0,042
		2006-07-06	0,015
4	2006-07-14	2006-07-06	0,015
		2006-08-04	0,037
5	2006-08-06	2006-08-04	0,037
		2006-09-04	0,033
6	2007-04-28	2007-04-04	0,019
		2007-05-03	0,02
7	2007-05-21	2007-05-03	0,02
		2007-06-04	0,023
8	2007-06-22	2007-06-04	0,023
		2007-07-03	0,02
9	2007-07-17	2007-07-03	0,02
		2007-08-01	0,017
10	2007-08-09	2007-07-03	0,02
		2007-08-01	0,017
		2007-09-05	0,053

Таблица 3. Данные гидрохимического мониторинга концентрации $P_{\text{общ}}$ в реке Луга

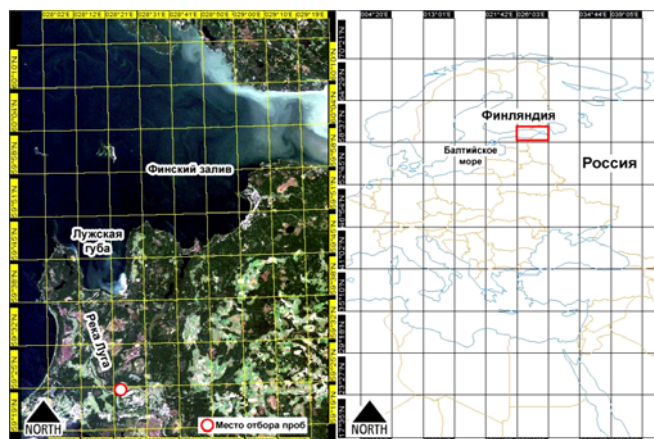


Рис. 1. Регион Ленинградской области, Финский залив, Лужская губа, река Луга

Результаты и показатели корреляционной модели

Результаты статистических расчетов, выполненные в Microsoft Excel (табл. 4), показывают, что модель способна объяснить порядка 62% дисперсии $P_{\text{общ}}$ (рис. 5). Коэффициенты, полученные по спутниковым изображениям, коррелируют с данными гидрохимического мониторинга $P_{\text{общ}}$ (табл. 4), со значениями R^2 в диапазоне 0,01–0,457 (рис. 2–4).

Данные гидрохимического мониторинга $P_{\text{общ}}$, мг/л	Сенсор Landsat 5 (TM)			Смоделированные значения содержания $P_{\text{общ}}$, мг/л
	Канал TM1	Соотношение каналов TM1/TM3	Соотношение каналов TM3/TM2	
0,04	0,095	2,101	0,736	0,0354
0,05	0,09	2,359	0,692	0,0452
0,042	0,083	2,488	0,666	0,0442
0,015	0,09	1,969	0,742	0,0217
0,037	0,081	2,03	0,677	0,0195
0,02	0,096	1,897	0,786	0,0217
0,02	0,086	1,986	0,736	0,0176
0,023	0,088	1,969	0,668	0,0278
0,02	0,081	2,162	0,677	0,0254
0,017	0,08	2,153	0,666	0,0249
1,414889	0,04476218	-0,11991566	-0,10471366	коэффициенты уравнения
0,906651	0,02063364	0,14203389	0,09435915	стандартная ошибка

Таблица 4. Переменные, использованные при моделировании данных

Результат, полученный из модели регрессии в Microsoft Excel, дает следующее уравнение:
 $P_{\text{общ}} = 1,4148892187127(TM1) + 0,0447621865917691(TM1/3) - 0,119915663952131(TM3/2) - 0,104713665977195;$
 $R^2 = 0,628698723.$

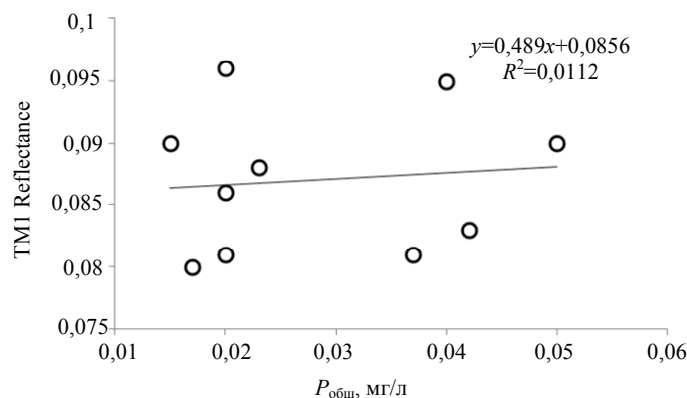


Рис. 2. Корреляционное поле зависимости значений Reflectance канала TM1 сенсора Landsat 5 (TM) от данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{\text{общ}}$

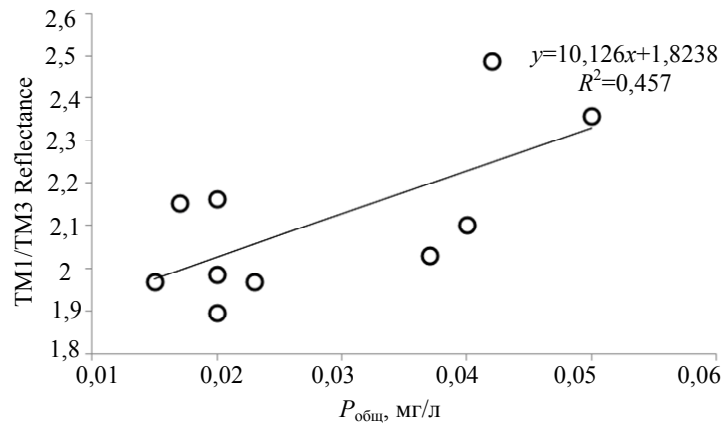


Рис. 3. Корреляционное поле зависимости отношения значений Reflectance каналов TM1/TM3 сенсора Landsat 5 (TM) и данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{общ}$

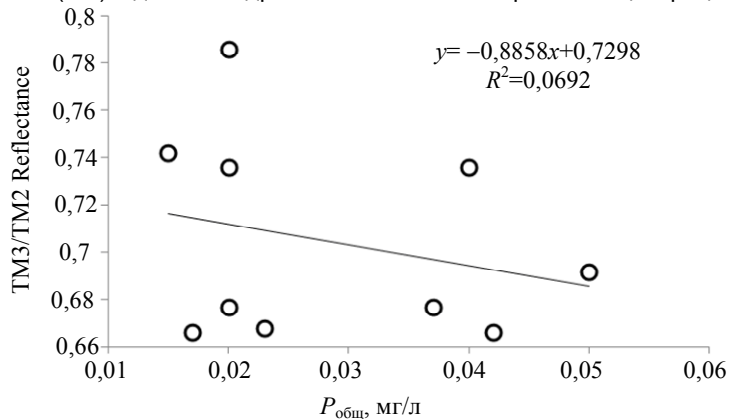


Рис. 4. Корреляционное поле зависимости отношения значений Reflectance каналов TM3/TM2 сенсора Landsat 5 (TM) и данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{общ}$

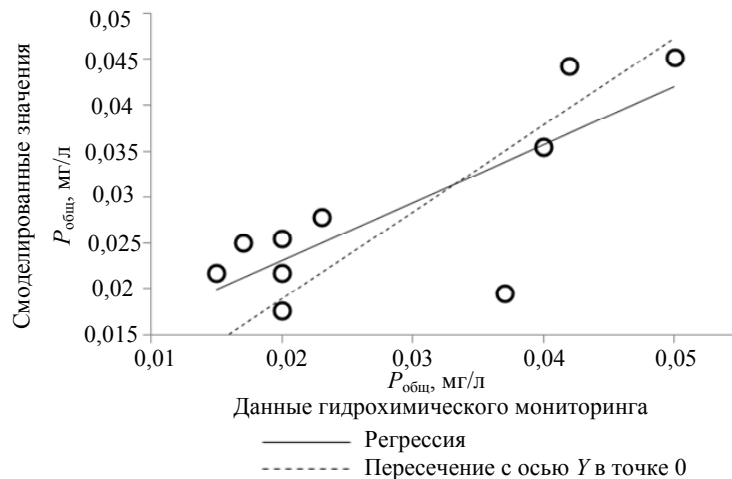


Рис. 5. Корреляционное поле зависимости смоделированных значений концентрации $P_{общ}$ от данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{общ}$

Корреляция между значением коэффициента отражения каналов TM1/TM3 сенсора Landsat 5 (TM) и данными гидрохимического мониторинга $P_{общ}$ в состоянии объяснить порядка 45% изменений значений $P_{общ}$ (рис. 3). Значения отражательной способности (Reflectance) на этом рисунке колеблются в диапазоне 1,9–2,5.

Отношение между аппроксимированным значением $Chl-a$ и измеренным $P_{общ}$ составляет 0,0692 (рис. 4). Относительно низкое значение R^2 (рис. 2–4) не указывает на неработоспособность модели, поскольку полученные коэффициенты не имеют прямого отношения к $P_{общ}$ [17], а представлены для лучшей визуализации данных, используемых при построении модели. На рис. 6 показана разница между натурными измерениями и смоделированными значениями концентрации $P_{общ}$.

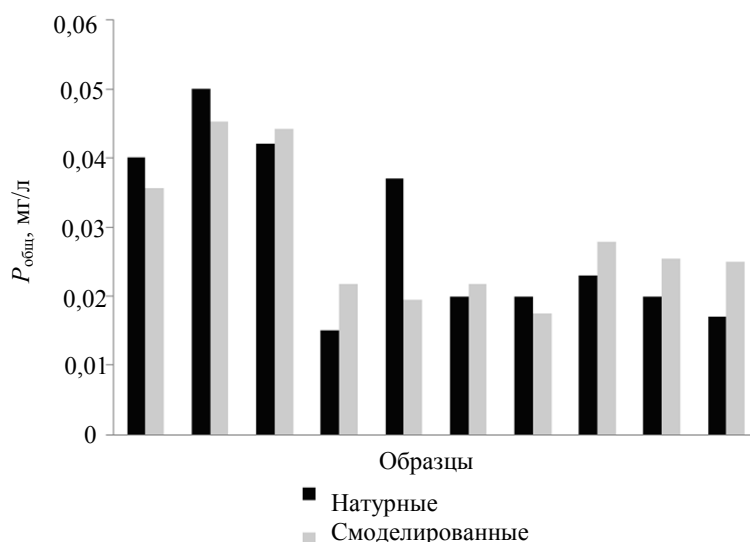


Рис. 6. Натурные и смоделированные значения концентрации $P_{\text{общ}}$

Заключение

Применение модели Wu и др. [6] на выбранном участке (рис. 1) показало, что она способна объяснить порядка 62% дисперсии смоделированных значений концентрации общего фосфора (табл. 4). Значение R^2 между измеренными концентрациями $P_{\text{общ}}$ и Reflectance канала TM1 сенсора Landsat 5 (TM) составляет 0,0112 (рис. 2). В статье Wu и др. [6] показатель R^2 корреляционного поля зависимости значений Reflectance канала TM1 сенсора Landsat 5 (TM) от данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{\text{общ}}$ равен 0,65, а в исследовании Andersson [17] (2012) R^2 для этой же зависимости он составляет 0,1007. Существенное различие значения R^2 корреляционного поля зависимости Reflectance канала TM1 сенсора Landsat 5 (TM) от данных гидрохимического мониторинга концентрации $P_{\text{общ}}$ в представленных работах указывает на то, что использование данной зависимости в дальнейших исследованиях для региона Балтийского моря в качестве одного из показателей модели должно быть рассмотрено дополнительно [17], в связи с вероятностью высокой погрешности.

Модель, описанная Wu и др. [6], работает достаточно хорошо в условиях Балтийского моря. Это подтверждается, в том числе, работой Andersson [17]. Стоит учитывать и тот факт, что различные воды имеют различные свойства, а, следовательно, и отражательную способность, что делает проблематичным оценку больших регионов без проведения дополнительных измерений на местах. Однако использование дополнительных классификаций и применение разработанных эталонов для различных регионов, возможно, позволит решить эту проблему [15, 17]. Для дальнейших исследований необходимо произвести больше наземных измерений, которые по времени будут совпадать с информацией, получаемой со спутников, а также более детально учесть местные климатические особенности и временные факторы, которые могут оказать существенное влияние на результаты.

Литература

1. Cloern J.E. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem // *Marine Ecology Progress Series*. – 2001. – V. 210. – P. 223–253.
2. Grizetti B., Boraoui F., Aloe A. Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas // *Global Change Biology*. – 2011. – V. 18. – P. 769–782.
3. Savage C., Leavitt P.R., Elmgren R. Effects of land use, urbanization, and climate variability on coastal eutrophication in the Baltic Sea // *Limnol. Oceanogr.* – 2010. – V. 55. – № 3. – P. 1033–1046.
4. Rockstrom J., Steffen W., Noone K., Persson E., Chapin S., Lambin E.F., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J.A. A safe operating space for humanity // *Nature*. – 2009. – V. 461. – P. 472–475.
5. HELCOM 2005. Nutrient Pollution to the Baltic Sea in 2000. – *Baltic Sea Environment Proceedings*. – № 100.
6. Wu C., Wu J., Qi J., Zhang L., Huang H., Lou L., Chen Y. Empirical estimation of total phosphorus concentrations in the mainstream of the Quintang River in China using Landsat TM data // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – V. 31. – № 9. – P. 2309–2324.
7. United States Geological Survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php, свободный. Яз. англ. (дата обращения)

- 30.05.2013).
8. Sriwongsitanon N., Surakit K., Thianpopirug S. Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application // Journal of Hydrology. – 2011. – V. 401. – № 3–4. – P. 203–220.
 9. Allee R.J., Johnson J.E. Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll-a and Secchi disk depth of Bull Shoals Reservoir, Arkansas, USA // International Journal of Remote Sensing. – 1999. – V. 20. – № 6. – P. 1057–1072.
 10. Allan M.G., Hamilton D.P., Hicks B.J., Brabyn L. Landsat remote sensing of chlorophyll a concentrations in central North Island lakes of New Zealand // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – № 7. – P. 2037–2055.
 11. Kratzer S., Hekansson B., Sahlin C. Assessing secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data // Ambio. – 2003. – V. 32. – № 8. – P. 577–585.
 12. HELCOM 2009. Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. Helsinki Commission. – Baltic Sea Environment Proceeding. – № 115B.
 13. Geng X., Zhao Y. et al. A new volume formula for a simplex and its application to endmember extraction for hyperspectral image analysis // International Journal of Remote Sensing. – 2010. – V. 31. – № 4. – P. 1027–1035.
 14. Härmä P., Vepsäläinen J., Hannonen T., Pyhälähti T., Kämäri J., Kallio K., Eloheimo K., Koponen S. Detection of Water Quality using Simulated Satellite Data and Semi-empirical Algorithms in Finland // The Science of Total Environment. – 2001. – V. 268. – № 1–3. – P. 107–121.
 15. Kloiber S.M., Brezonik P.L., Olmanson L.G., Bauer M.E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data // Remote Sensing of the Environment. – 2002. – V. 82. – P. 38–47.
 16. Pulliainen J., Kallio K., Eloheimo K., Koponen S., Servomaa H., Hannonen T., Tauriainen S., Hallikainen M. A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data // The Science of the Total Environment. – 2001. – V. 268. – P. 79–93.
 17. Andersson M. Estimating Phosphorus in rivers of Central Sweden using Landsat TM data. – Stockholm University, 2012. – 23 p.
 18. Allen R.G., Bastiaanssen W.B.M., Tasumi M., Morse A. Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and LandSat Images. – 2001. – ASAE, Annual International Meeting, Sacramento, California, July 30–August 1. – Paper Number 01-2224.
 19. Koponen S., Pulliainen J., Servomaa H., Zhang Y., Hallikainen M., Kallio K., Vepsäläinen J., Pyhälähti T., Hannonen T. Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish lakes // The Science of the Total Environment. – 2001. – V. 268. – P. 95–106.
 20. Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney M.P., Macomber S.A. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? // Remote Sensing of Environment. – 2001. – V. 75. – P. 230–240.
 21. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections – Revisited and Improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1996. – V. 62. – № 9. – P. 1025–1036.

- Каприлов Евгений Геннадьевич** – Санкт-Петербургский государственный университет, зав. кафедрой; Ресурсный центр космических и геоинформационных технологий, зам. директора; кандидат географических наук, доцент, egk06@yandex.ru
- Кунаева Елена Петровна** – Санкт-Петербургский государственный университет, Ресурсный центр космических и геоинформационных технологий, специалист, e.kunaeva@spbu.ru
- Кустикова Марина Александровна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, marinakustikova@mail.ru
- Медник Михаил Борисович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, leaderfins@gmail.com

УДК 001.891.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ**

В.А. Быченко, И.Ю. Кинжагулов, И.В. Беркутов, М.П. Марусин, И.Е Щерба

Рассмотрены основные методы, применимые для определения напряженно-деформированного состояния специальных материалов изделий. Проведены экспериментальные исследования зависимости скорости распространения упругих волн от напряжений в различных образцах, выявлены преимущества метода лазерно-ультразвуковой диагностики, реализованного с помощью объемных волн для неразрушающего контроля одноосных напряжений в металлоконструкциях. Указанные преимущества метода лазерно-ультразвуковой диагностики и полученные результаты исследования на образцах из горячекатанной листовой стали 08кп толщиной 2 мм и стали АК33-СВ толщиной 20 мм при испытаниях на растяжение показали чувствительность не менее 3,5 м/с.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, неразрушающий контроль, метод лазерно-ультразвуковой диагностики.

Введение

Производство и эксплуатация металлических конструкций связаны с влиянием на их напряженное состояние множества различных факторов, которые не всегда можно учесть при прочностных расчетах. Прямые измерения механических напряжений в контрольных точках изделия могут быть эффективно использованы как для проверки правильности таких расчетов, так и для оперативной диагностики технического состояния специальных материалов изделий.

Расчетные методы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) металлических конструкций основаны на использовании некоторых допущений, как правило, идеализирующих реальные условия. несовершенство методов расчета, неполное соответствие расчетных схем действительным условиям работы, неточность задания граничных условий и действующих нагрузок, как правило, изменяющихся с течением времени, дают существенные погрешности в оценке напряжений. Иногда задача по определению напряжений в действующей конструкции вообще не поддается теоретическому решению. В связи с этим экспериментальная оценка реального напряженного состояния изделий на различных этапах их жизненного цикла является весьма актуальной [1–3].

**Анализ существующих методов, применимых для определения напряженно-деформированного
состояния специальных материалов изделий**

Разнообразие прочностных задач, возникающих в промышленности, и необходимость их решения способствовали развитию целого ряда экспериментальных неразрушающих методов и средств определения деформаций и напряжений, использующих различные физические принципы. Однако многие из них не выходят за пределы лабораторной практики. На основе литературных источников и практических знаний выделены основные методы, применимые для неразрушающего контроля (НК) НДС изделий.

Метод тензометрии [4, 5] получил широкое распространение в практике экспериментальных исследований НДС металлоконструкций. В настоящее время тензометрирование проводят в основном с помощью струнных и электрических тензометров.

Метод электротензометрии является наиболее разработанным и широко применяемым во многих отраслях промышленности. Он основан на зависимости омического сопротивления проводника от его деформации [1]. В общем случае метод тензометрии позволяет определять лишь относительные деформации по отношению к тому значению деформации, которое соответствует моменту наклепки датчика или закрепления измерительной струны на поверхности материала конструкции. Если тензодатчики монтируются на объекты, уже находящиеся под нагрузкой, то «начальные» значения деформаций остаются неизвестными. Определение напряжений по данным измерения деформаций проводят с использованием закона Гука. Для определения двухосного напряженного состояния необходимо применять тензометрическую розетку из трех тензорезисторов, оси которых направлены под углами 90° и 45° друг к другу. Главные напряжения на поверхности изотропного материала с их помощью находят по формулам

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 - \nu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 - \nu\varepsilon_1),$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации, определенные с помощью тензометрической розетки.

Рентгено-структурный метод. Применение радиационных методов НК [6] для исследования напряженного состояния в металлах и сплавах основано на явлении дифракции рентгеновских лучей при прохождении их через кристаллическую решетку исследуемого материала.

Несмотря на очевидную эффективность использования рентгеноструктурного метода и рентгеновских портативных дифрактометров для контроля остаточных и действующих напряжений в металлоконструкциях, существуют следующие объективные ограничения его применения:

- исследование труднодоступных участков конструкций ограничивается размерами гониометрической части прибора;
- невозможность использования дифрактометров на вертикальных плоскостях крупногабаритных изделий;
- невозможность электролитического травления на вертикальных стенках корабельных конструкций;
- трудоемкая процедура электролитической подготовки поверхности снижает оперативность проведения контроля напряжений;
- жесткие требования по радиационной безопасности, необходимость оформления санитарно-эпидемиологического заключения.

Метод измерения шумов Баркгаузена основан на связи между намагничиванием ферромагнетика и величиной механических напряжений [7].

Энергетический спектр шумов Баркгаузена находится в диапазоне частот, начинающемся от частоты внешнего намагничивающего поля и расширяющемся в большинстве материалов до 250–500 кГц. Этот шум экспоненциально затухает в зависимости от расстояния вглубь от поверхности материала. Основными факторами, определяющими глубину, на которой заметен эффект, являются электропроводность и магнитная проницаемость испытываемого материала, а также частотный диапазон, выбранный для анализа (для стали эта глубина варьируется от 0,01 до 3 мм). Интенсивность шумов Баркгаузена зависит от приложенного усилия и микроструктуры материала, а точность определения одно- и двухосных поверхностных напряжений – от соответствия микроструктуры калибровочного и испытываемого образцов.

Достоинства метода – оперативность и простота процедур измерений, относительно невысокие требования к подготовке поверхности области контроля. Недостатки метода – низкая чувствительность при измерениях на материалах с высокой твердостью, сильная нелинейность характеристики при деформациях сжатия, значительная погрешность при низких уровнях напряжений.

Метод, основанный на измерении коэрцитивной силы, использует зависимость ее величины от механических напряжений, возникающих при нагружении ферромагнитного объекта. Приращение коэрцитивной силы при растяжении и сжатии в упругой области составляет десятки процентов от начального уровня, отсутствует гистерезис характеристик. Это позволяет использовать экспериментально полученные тарировочные зависимости для определения механических напряжений по коэрцитивной силе.

При растяжении в области упругих деформаций и последующем снятии нагрузки изменение коэрцитивной силы соответствует одной и той же зависимости от напряжений. Превышение напряжения над пределом текучести вызывает скачок значений коэрцитивной силы, а последующая разгрузка приводит к возникновению петли гистерезиса и к увеличению коэрцитивной силы в разгруженном состоянии. Непосредственное определение напряжений при двухосном нагружении во многих случаях невозможно, однако можно определить направления главных деформаций. Направление главной наибольшей деформации совпадает с направлением, в котором коэрцитивная сила минимальна, а направление главной наименьшей деформации – с направлением максимальной. При двухосном сжатии наблюдается обратная зависимость [7].

Стоит упомянуть также еще об одном относительно новом неразрушающем методе, постепенно заслуживающем признание как у нас в стране, так и за рубежом – **методе магнитной памяти металла** (ММП) [7]. Данный метод основан на регистрации собственных магнитных полей, возникающих в материале в локальных зонах концентрации напряжений. При этом величина магнитных полей рассеяния в объекте контроля (ОК) отражает тензор магнитной проницаемости, соответствующий тензору деформации и напряжений, обусловленных действием рабочих нагрузок.

Преимуществом метода магнитной памяти можно считать то, что он основан на использовании собственного магнитного поля рассеяния, возникающего в зонах устойчивых полос скольжения дислокации, обусловленных действием рабочих нагрузок. Среди существенных недостатков метода можно выделить применимость только к ферромагнитным материалам и невозможность определения абсолютных значений напряжений – ММП определяет лишь области концентрации напряжений и градиенты этих напряжений.

Одним из наиболее перспективных методов измерения механических напряжений в материале без его разрушения является **акустический метод**, основанный на упругоакустическом эффекте – линейной зависимости скорости распространения упругих волн от напряжений. Одна из основных сложностей данного метода заключается в том, что относительное изменение скорости звука даже при напряжениях

на пороге текучести невелико и, как правило, не превышает нескольких процентов. При напряжениях порядка 100 МПа относительное изменение скоростей упругих волн лежит в диапазоне 10^{-3} – 10^{-4} . По этой причине требуется высокая точность измерения скорости распространения ультразвука [8, 9], которую нужно измерять достаточно локально. Такой прецизионной точности можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики [8]. Следует отметить, что вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости ультразвука является очень важным для данного метода, но не всегда очевидно разрешимым. При этом используется так называемый времяпролетный метод измерений: по известной базе измерений L , измеряемой разности времен излучения лазерного импульса в ОК Δt и задержке сигнала в излучаемом тракте Δt_0 рассчитывается скорость продольной подповерхностной и продольной ультразвуковых волн в ОК:

$$c_l = \frac{L}{\Delta t - \Delta t_0}.$$

Методика обработки сигналов должна быть основана на спектральном анализе ультразвукового сигнала и измерении временного положения характерных точек трека.

Экспериментальные исследования и их результаты

Экспериментальные исследования зависимости скорости распространения упругих волн от напряжений проводились на испытательном стенде (схема измерений представлена на рис. 1) с динамометром с погрешностью измерения нагрузки 5 Н (для стали 08кп) и испытательной машине ZDM-100 с точностью измерения статической нагрузки $\pm 1\%$ (для стали АК33-СВ). Исследуемые образцы представляли прямую пластину постоянного сечения из горячекатанной листовой стали 08кп толщиной 2 мм и стали АК33-СВ толщиной 20 мм.

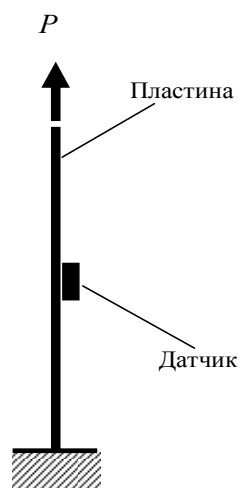


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований

Пластины подвергались нагружению по ступеням по 2,5 кН до 20 кН (для стали 08кп) и по 50 кН до 450 кН (для стали АК33-СВ), после чего нагрузка снималась. На каждой ступени измерялись скорость ультразвука продольной подповерхностной и продольной волн (для стали 08кп), продольной подповерхностной волны (для стали АК33-СВ), а также приложенная нагрузка.

Измерения скорости распространения упругих волн от напряжений производились лазерно-ультразвуковым дефектоскопом (модель УДЛ-2М) с наклонным оптико-акустическим преобразователем (модель ПЛУ-6Н-02). На рис. 2 представлена схема наклонного оптико-акустического преобразователя (модель ПЛУ-6Н-02).

В преобразователе лазерное излучение попадает в излучающий тракт с помощью оптического волокна и сквозь прозрачную для него тыльную нагрузку попадает на лицевую поверхность специально-оптико-акустического генератора, представляющего собой плоскопараллельную пластину из поглощающего свет пластика. Радиус лазерного пятна, падающего на поверхность генератора, равен a . Соответственно и возбуждаемый акустический пучок имеет радиус, близкий к a . Из генератора в ОК акустический пучок попадает сквозь звукопровод, который представляет собой сделанную из синтетического полимера (метилметакрилата) призму, благодаря чему акустическое излучение заводится под углом. Прозрачная призма широкополосного пьезоэлектрического приемника является также звукопроводом акустического сигнала. Акустический контакт при контроле обеспечивается прижимом датчика к контролируемой поверхности через тонкий иммерсионный слой контактной жидкости.

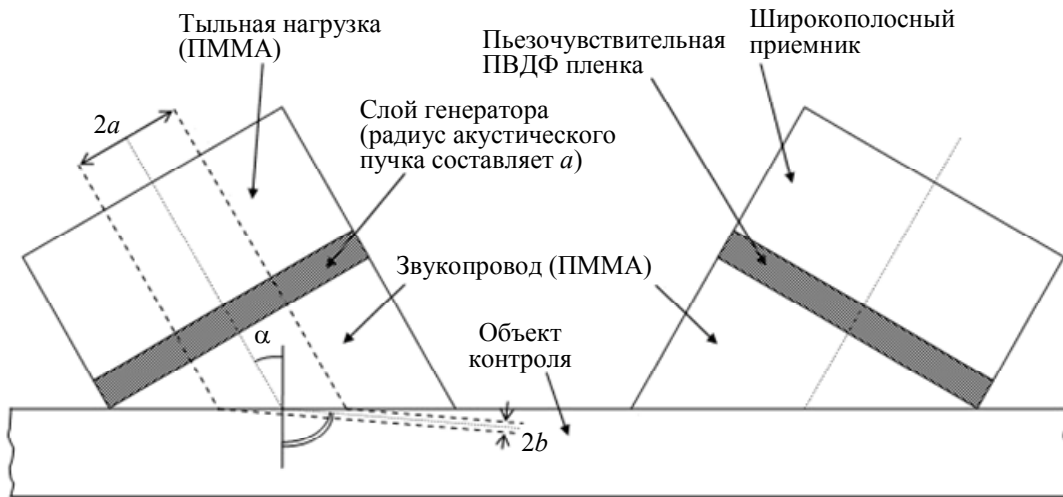


Рис. 2. Схема наклонного оптико-акустического преобразователя (модель ПЛУ-6Н-02): ПММА – полиметилметакрилат; ПВДФ – поливинилиденфторид

Измерение скорости ультразвука в исследуемом ОК производится по измерению задержки между несколькими переотражениями внутри ОК. Первым приходит импульс продольной подповерхностной волны (рис. 3, а), который хорошо выделяется по времени относительно остальных импульсов и позволяет измерять скорость головных волн в образце с высокой точностью. Вторым приходит более слабый переотраженный импульс продольной подповерхностной волны (рис. 3, б). Так как скорость C_r распространения продольной подповерхностной волны приблизительно на 4% больше скорости C_l продольной волны ($C_r \cong 1,04 C_l$), третьим приходит импульс продольной волны (рис. 3, в). Расчет скорости по зарегистрированному времени прихода волны осуществлялся автоматически программными средствами. Измерение нескольких типов волн и последующий анализ полученных результатов измерений позволяют более точно методом лазерно-ультразвуковой диагностики с данным датчиком контролировать остаточные напряжения в специальных материалах изделий.



Рис. 3. Окно программы для измерения скорости ультразвуковых волн: а – импульс продольной подповерхностной волны; б – переотраженный импульс продольной подповерхностной волны; в – импульс продольной волны

Обработка результатов исследований производилась по следующим формулам:

- средняя скорость распространения ультразвуковой волны в образце

$$V_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i ;$$

- среднеквадратическое отклонение скорости распространения ультразвуковой волны в образце

$$S_V = \sqrt{\frac{(V_i - V_{cp})^2}{N - 1}} ;$$

- случайная погрешность измерений скорости распространения ультразвуковой волны для доверительной вероятности $p = 0,95$

$$\delta = t_{p,m} \frac{S_V}{\sqrt{N}} \text{ (коэффициент Стьюдента } t_{p,m} = 2,26).$$

Результаты обработки полученных экспериментальных данных представлены в табл. 1, 2.

№ п/п	σ_p , МПа	V_{cp} , м/с	S_V , м/с	δ , м/с
1	0	5956,4	1,65	1,18
2	18	5954,5	1,72	1,23
3	36	5952,8	1,75	1,75
4	54	5951,0	1,25	1,25
5	71	5949,6	1,71	1,71
6	89	5948,8	1,75	1,75
7	107	5947,5	1,49	1,06
8	125	5947,3	2,00	1,43
9	143	5947,0	1,57	1,57

Таблица 1. Результаты обработки измерений скорости распространения продольных подповерхностных (головных) ультразвуковых волн

№ п/п	σ_p , МПа	V_{cp} , м/с	S_V , м/с	δ , м/с
1	0	5764,3	0,48	0,34
2	18	5762,2	0,79	0,56
3	36	5761,2	0,79	0,79
4	54	5760,2	0,79	0,79
5	71	5758,6	0,52	0,52
6	89	5757,8	0,79	0,79
7	107	5756,9	0,88	0,63
8	125	5755,7	0,67	0,48
9	143	5754,5	0,53	0,53

Таблица 2. Результаты обработки измерений скорости распространения продольных ультразвуковых волн

Зависимости изменения растягивающих напряжений в образце от скорости распространения продольных подповерхностных и продольных волн представлены на рис. 4, 5.

Соответствующие уравнения регрессии имеют вид:

$$\sigma = -14,022C_r + 83507;$$

$$\sigma = -15,205C_l + 87637,$$

а коэффициенты корреляции достаточно высоки и составляют 0,9536 для C_r и 0,9903 для C_l .

Полученные уравнения регрессии близки и адекватны ранее полученному:

$$C_r = -0,0735 \sigma + 5817,2 [10].$$

Аналогично были выполнены экспериментальные исследования зависимости скорости распространения ультразвуковой волны от приложенной нагрузки на образцах стали АК33-СВ. Результаты обработки полученных данных представлены в табл. 3, а зависимость изменения растягивающих напряжений в образце от скорости распространения ультразвуковой волны – на рис. 6.

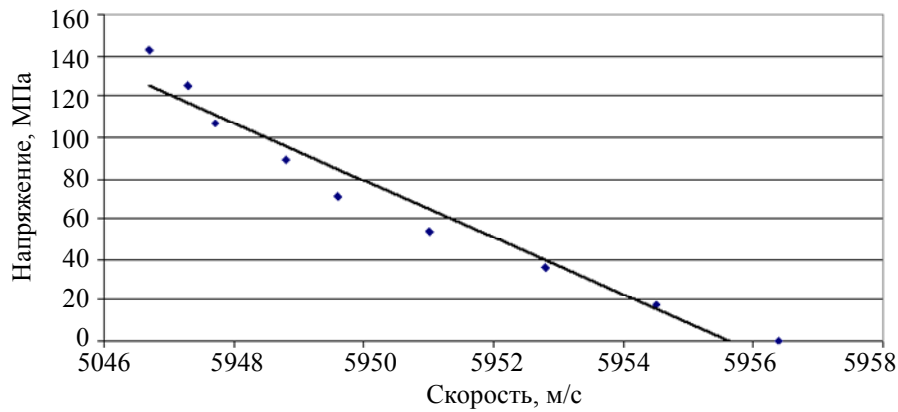


Рис. 4. Зависимость изменения растягивающих напряжений в образце от скорости распространения продольной подповерхностной волны: \blacklozenge – экспериментальные точки; — – линия регрессии

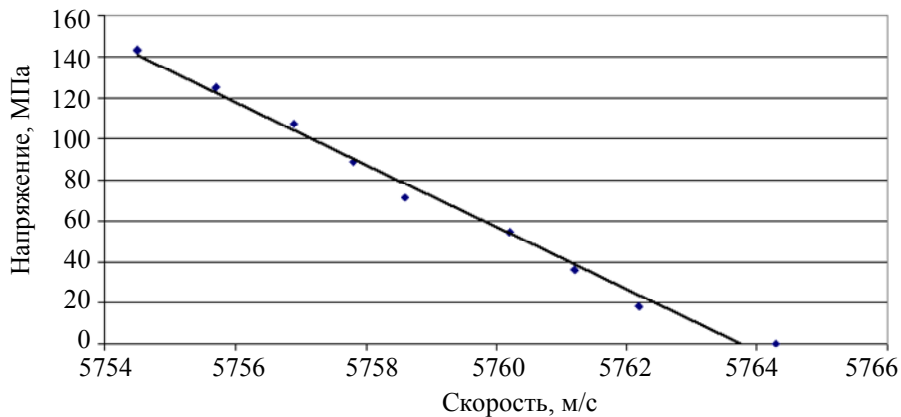


Рис. 5. Зависимость изменения растягивающих напряжений в образце от скорости распространения продольной волны: \blacklozenge – экспериментальные точки; — – линия регрессии

№ п/п	σ_p , МПа	V_{cp} , м/с	S_{ν} , м/с	δ , м/с
1	0	5823	3,14	1,74
2	82	5819	3,14	1,74
3	163	5810	3,50	1,94
4	245	5801	2,18	1,21
5	327	5796	2,40	1,33
6	408	5788	2,15	1,20
7	490	5780	1,78	0,99
8	572	5778	1,93	1,07
9	653	5776	2,11	1,17
10	735	5769	1,98	1,10

Таблица 3. Результаты обработки измерений скорости распространения ультразвуковых волн в образце стали АК33-СВ

В изменение скорости звука могут вносить вклад сразу несколько факторов: анизотропия свойств деформированной стали, в частности, модулей упругости; неоднородное распределение примесей; неодинаковая плотность в различных участках металла. Естественно предположить, что вариации измеряемых величин связаны с изменением структуры стали в отдельных зонах листа.

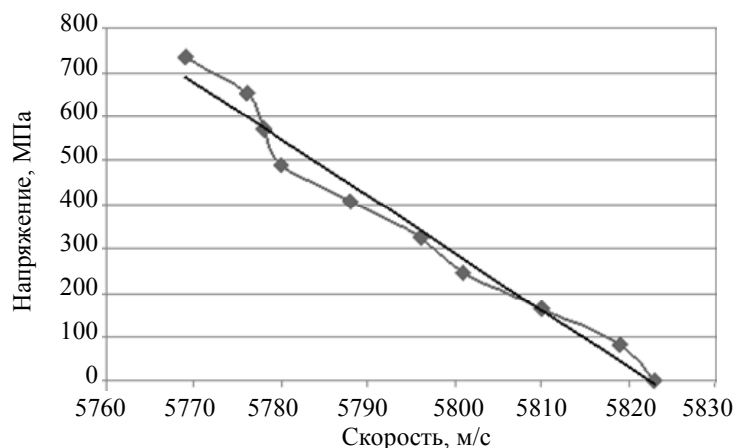


Рис. 6. Зависимость изменения растягивающих напряжений в образце от скорости распространения ультразвуковой волны: ♦ – экспериментальные точки; — – линия регрессии

Заключение

Анализ различных методов неразрушающего контроля для определения напряженно-деформированного состояния специальных материалов изделий, а также проведенные экспериментальные исследования изменения скорости распространения ультразвуковых волн в образцах из горячекатанной листовой стали 08кп толщиной 2 мм и стали АК33-СВ толщиной 20 мм при испытаниях на растяжение показали преимущества и достаточную чувствительность метода лазерно-ультразвуковой диагностики для определения напряжений в подповерхностном слое исследованных образцов. По результатам обработки измерений скорости распространения продольных подповерхностных (головных) ультразвуковых волн и продольных ультразвуковых волн для стали 08кп видно, что для контроля напряженно-деформированного состояния изделий толщиной 2 мм наиболее предпочтительно измерение скорости распространения продольных ультразвуковых волн ввиду меньшей случайной погрешности измерений и большего коэффициента регрессии (большая чувствительность изменяемого параметра). Линейный характер корреляционных зависимостей качественно можно объяснить функциональной связью скорости распространения ультразвука с упругими свойствами металлов. Более точную количественную связь между исследованными величинами можно получить при проведении дальнейших исследований.

Литература

1. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б., Лобанов Л.М. и др. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. – Киев: Наукова думка, 1981. – 584 с.
2. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
3. Экспериментальная механика / Под ред. А. Кобаяси. В 2-х томах. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 616 с.
4. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль; Кн. 2: К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. Электрический контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.
5. Дайчик М.Л., Пригоровский Н.М., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
6. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1: Ф.Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль; Кн. 2: Ф.Р. Соснин. Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 560 с.
7. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: В.В. Клюев, В.Ф. Мужичкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. Магнитные методы контроля; Кн. 2: В.Н. Филинов, А.А. Кеткович, М.В. Филинов. Оптический контроль; Кн. 3: В.И. Матвеев. Радиоволновой контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 832 с.
8. Ивочкин А.Ю., Карабутов А.А., Лямшев М.Л., Пеливанов И.М., Рохатги У., Субудхи М. Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53. – № 4. – С. 540–547.
9. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 151 с.
10. Беркутов И.В., Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю., Никитина М.С., Разводовский И.С. Использование метода лазерно-ультразвуковой диагностики для определения напряженно-деформированного состояния изделий и дефектов в сварных швах // Инновации в науке: материалы XV международной заочной научно-практической конференции (19 декабря 2012 г.) – Новосибирск: Изд. «СибАК», 2012. – 196 с.

- Быченко Владимир Анатольевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bychenokvladimir@mail.ru
- Кинжагулов Игорь Юрьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kinzhiki@mail.ru
- Беркутов Игорь Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, chigivara56712@mail.ru
- Марусин Михаил Петрович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mishasp06@mail.ru
- Щерба Ирина Евгеньевна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sherbairina@mail.ru

УДК 004.42; 519.85; 681.518.2

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИИ ЭКСТРУДЕРА

Н.А. Мустюков, Т.М. Зубкова

Экструзионный процесс – это переработка продуктов в экструдере путем размягчения или пластификации и придания им нужной формы при продавливании через экструзионную головку, сечение фильер которой соответствует конфигурации изделия. Получаемые в результате экструзионной переработки продукты сложны по химическому составу и обладают комплексом свойств, которые определяют качество продукции и должны быть учтены при расчете технологических машин и их совершенствовании. В работе описано использование генетического алгоритма и методов экспертной оценки на этапе проведения параметрического синтеза конструкции шнекового прессующего механизма. В частности, приведено программное решение задачи максимизации КПД экструдера путем варьирования геометрических и конструктивных параметров. В результате удалось увеличить КПД конструкции с 3,1% до 6,8% за счет корректировки размеров шнека, при этом преобразования конструкции соответствуют накладываемым ограничениям. Полученные результаты показывают, что программная система может быть использована инженерами-конструкторами для проектирования новых и совершенствования существующих моделей экструзионной техники.

Ключевые слова: экструзионная техника, генетический алгоритм, модель оптимизации, имитационная модель, программная система.

Введение

Экструзионная техника находит широкое применение в перерабатывающих отраслях агропромышленного комплекса, пищевой, химической, резинотехнической, силикатной, бумажной, металлургической, оборонной промышленности, при производстве и переработке пластических масс и др.

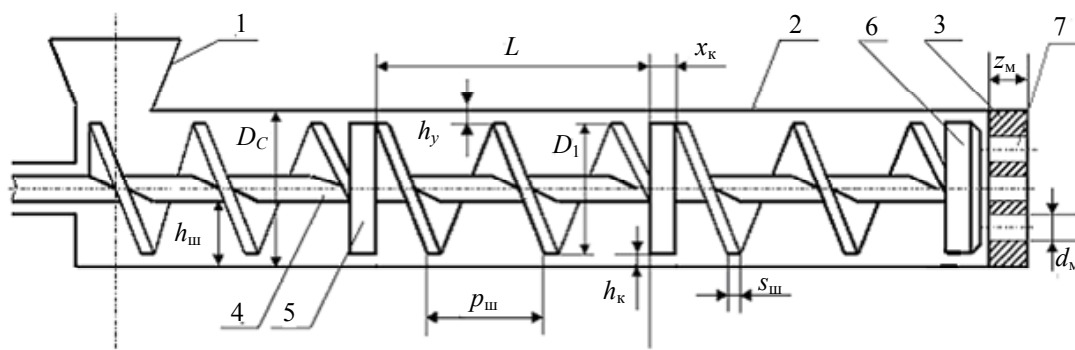


Рис. 1. Схема прессующего механизма: 1 – загрузочное устройство; 2 – шнековый цилиндр; 3 – матрица; 4 – шнек; 5 – компрессионный затвор; 6 – головка экструдера; 7 – фильера

Для расчета технико-экономических параметров и проведения параметрического синтеза конструкции шнекового прессующего механизма (рис. 1) необходимо оценить напряженное состояние пресуемого материала на контактных поверхностях рабочих органов экструдера, которое является внутренней характеристикой системы данного технологического объекта [1]. Для этого составляется и решается система уравнений движения обрабатываемого материала в рабочем пространстве машины, формируемая путем преобразования системы уравнений неразрывности объемной производительности:

$$\begin{cases} Q_{\text{ш}} - Q_y = Q_k, \\ Q_k = Q_m = k_{\text{ф}} Q_{\text{ф}}, \end{cases}$$

где $Q_{ш}$ – объемный расход шнековых каналов, образуемых лопастями шнека; Q_y – объемный расход прессуемого материала в зазорах между вершинами лопастей и цилиндрической поверхностью шнекового цилиндра; Q_k – объемный расход компрессионного затвора; Q_m – объемный расход в предматричном пространстве, образуемом корпусом шнека и матрицей; Q_{ϕ} – объемный расход одной фильеры матрицы; k_{ϕ} – число фильер в матрице.

Значения объемных расходов вычисляются на основе кинематических расчетов с использованием уравнения Оствальда-де Вилля, связывающего напряжение сдвига τ_{xy} и скорость сдвига $\dot{\gamma}_x$:

$$\tau_{xy} = \mu' \dot{\gamma}_x^n,$$

где μ' – коэффициент консистенции прессуемого материала; n – индекс течения материала.

Решая систему уравнений, получаем значения напряжений на контактных поверхностях рабочих органов машины, что позволяет определить технико-экономические параметры процесса экструдирования – производительность, энергоемкость, время прессования, КПД, параметры, характеризующие качество выпускаемой продукции [1]. Данная математическая модель реализована в программной системе (ПС) «Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров» [2]. В ПС используются следующие входные данные: D_c – диаметр цилиндра; D_1 – внешний диаметр винтовой линии шнека; $s_{ш}$ – толщина лопасти шнека; $p_{ш}$ – шаг винтовой лопасти шнека; $h_{ш}$ – высота гребней шнека; h_y – расстояние между шнеком и цилиндром; L – длина шнека; x_k – ширина компрессионного затвора; h_k – высота компрессионного затвора; d_m – диаметр фильеры матрицы; z_m – длина фильеры матрицы; α – угол подъема витка шнека и др., а также конструктивные параметры: k_{ϕ} – число фильер; q – число заходов шнека (обозначения соответствуют рис. 1). Также задаются реологические свойства обрабатываемого материала с учетом изменяющейся температуры в процессе прессования и скорость протекания технологического процесса. В результате расчета определяются: Q_m – производительность экструдера; N – мощность сил полезного сопротивления; R – сила, действующая на матрицу; $t_{ш}$ – время прессования материала в шнеке; t_m – время прессования материала в фильерах матрицы; S_n – импульс нормальных напряжений в материале; S_t – импульс касательных напряжений в материале; η – КПД экструдера и др.

По полученным результатам исследователь может сделать заключение о целесообразности использования данной конструкции для конкретного сырья либо повторить расчет, варьируя конструктивные параметры. Однако одно из требований автоматизированного проектирования – это максимальное освобождение инженера-конструктора от рутинных работ, требующих каких-либо вычислений или количественных оценок проектных ситуаций, так как достаточно сложно перебрать все возможные варианты и сделать оптимальный выбор [3].

Таким образом, одной из основных проблем автоматизации проектирования остается задача улучшения значений технико-экономических параметров процесса экструдирования (увеличение производительности, уменьшение энергоемкости и т.д.). В частности, в настоящей работе целью оптимизации является повышение значения КПД.

Для решения поставленной задачи требуется проведение параметрической оптимизации конструкции одношнекового экструдера на основе рассмотренной ранее математической модели с учетом целей оптимизации и граничных условий, заданными следующими факторами:

- конструкцией экструдера;
- математической моделью;
- экспертным мнением инженера-конструктора.

Выбор метода оптимизации

В последнее время получили развитие эвристические методы решения многопараметрической задачи оптимизации. Эвристические методы применимы тогда, когда точные методы не могут быть использованы из-за необходимости проведения громадных по объему вычислений.

Представителями эвристических методов являются генетические алгоритмы. Генетический алгоритм (ГА) – это эвристический алгоритм решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [4].

ГА может работать не только с некоторой целевой функцией $Z(u_1, u_2, \dots, u_n)$, но и с каким-либо блоком (набором некоторых действий, операций и вычислений), который на вход получает некоторый набор значений u_1, u_2, \dots, u_n , а на выходе выдает результат, напрямую зависящий от входящих значений.

ГА, включающий возможность задать различные критерии отбора, позволит учитывать граничные условия, необходимые для успешного протекания технологического процесса и соответствия показателей процесса требуемым значениям.

Таким образом, ГА является наиболее удобным методом при реализации подсистемы поддержки принятия решения для выбора оптимального набора конструктивных, геометрических и кинематических параметров экструдера на основе имитационного моделирования.

Реализация этапов генетического алгоритма

Для генерации начальной популяции эффективнее использовать результаты предшествующих экспериментов. В качестве способа отбора значений из перечня множества результатов, с учетом критериев и целей оптимизации, будем использовать метод «мягких» вычислений Мамдани, основанный на минимаксной композиции нечетких множеств:

$$MF = \max \left(\min (A_{ik} (x_k)) \right).$$

Здесь x_k – входные переменные (конструктивные параметры экструдера: D_1 , $s_{ш}$, $p_{ш}$, $h_{ш}$, L и др.); A_{ik} – заданные нечеткие множества с функциями принадлежности входных переменных требуемым параметрам.

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс. На каждом поколении ГА реализуется отбор пропорционально приспособленности, одноточечный кроссовер и мутация. Отбор производится за счет назначения каждой структуре вероятности $Ps(i)$, равной отношению ее приспособленности к суммарной приспособленности популяции:

$$Ps(i) = \frac{f(i)}{\sum_{j=1}^N f(j)},$$

где $i = 1, \dots, N$; N – количество оцениваемых конструкций экструдера; $f(i)$ – соответствие требованиям i -ой конструкции.

Формально получение новых конструкций экструдера (скрещивание) можно представить выражением

$$h_k = c_k^1 + w \times (c_k^2 - c_k^1),$$

где h_k – k -й параметр конструкции $H = (h_1, \dots, h_n)$, $k = \overline{1, n}$; n – количество параметров; c_k^m – k -й элемент родительской конструкции $C^m = (h_1^m, \dots, h_n^m)$, $k = \overline{1, n}$, $m = \overline{1, 2}$; w – случайное число интервала $[-0, 25; 1, 25]$.

Элемент мутации будем определять следующим образом:

$$x_k = a_k + (b_k - a_k) \times u,$$

где x_k – k -й параметр конструкции $X = (x_1, \dots, x_n)$, $k = \overline{1, n}$, определенный на интервале $[a_k; b_k]$; u – случайное число интервала $[0; 1]$.

Построение модели оптимизации

Оптимизация на основе имитационного моделирования (ИМ) заключается в совместном использовании имитационной модели процесса проектирования и алгоритма оптимизации.

В качестве ИМ была использована математическая модель ПС «Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров», описанная ранее [1, 2]. Набором входных параметров процесса являются реологические, конструктивные и кинематические параметры процесса, результатом моделирования – технико-экономические параметры.

Поисковый алгоритм оптимизации, в свою очередь, используя значения отклика, пытается улучшить решение, варьируя параметрами конструкции экструдера.

Реализация разработанной модели

Согласно описанной модели оптимизации была создана ПС «Оптимизация конструкции одношнекового экструдера адаптивными методами поиска» [5]. В ней реализованы алгоритм задания граничных условий параметров и целей оптимизации, проведение начальной выборки конструкций и оптимизация выбранных конструкций. Результат формирования начальной выборки конструкций, которые в дальнейшем используются для оптимизации, представлен на рис. 2.

Для базовой модели параметры выборки имеют следующие значения: диаметр шнека $D_1 = 0,0549$; осевой шаг винтовой полости $p_{ш} = 0,0321$; радиальная высота шнекового канала $h_{ш} = 0,0133$; осевая толщина винтовой полости $s_{ш} = 0,007$; осевая протяженность $L = 0,4$; число заходов $q = 1$ (все размеры приве-

дены в метрах). Скорость вращения шнека $\omega=20$ рад/с. Расчетные технико-экономические показатели: производительность $Q_M = 30,9$ кг/ч; мощность сил полезного сопротивления $N=1,7$ кВт; сила, действующая на матрицу, $R = 6,4$ кН; время прессования в канале шнека $t_{ш}=9,2$ с; время прессования в фильерах матрицы $t_m = 0,7$ с; импульс нормальных напряжений $S_\sigma=4$ 1,3 МПа·с, импульс касательных напряжений $S_\tau = 3,2$ МПа·с; $\eta = 3,1\%$. Целью оптимизации является увеличение КПД.

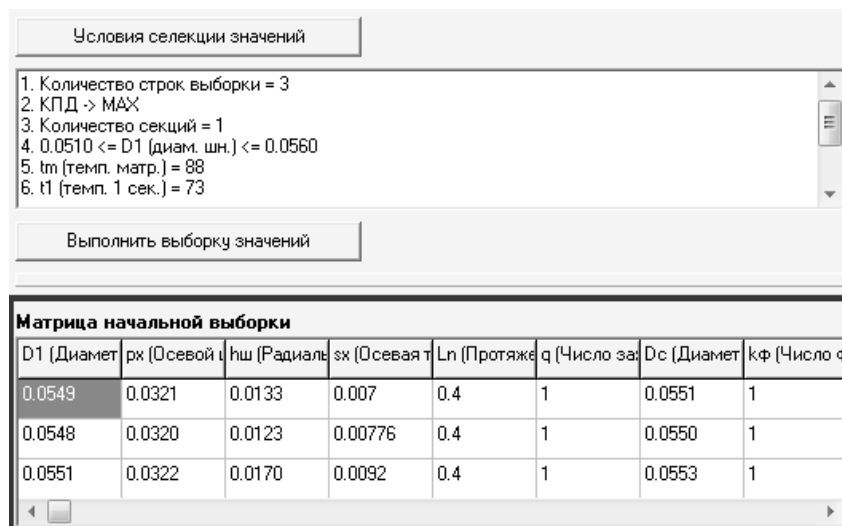


Рис. 2. Результат выборки

После формирования начальной выборки начинается этап улучшения показателей. В качестве критерия остановки алгоритма выбрано время работы (180 с).

После завершения алгоритма выводятся найденные значения выбранной группы параметров шнека ($D_1=0,0549$, $p_x=0,0321$, $h_{ш}=0,0133$, $s_x=0,007$, $L=0,4$, $q=1$) и технико-экономические показатели сформированного процесса экструдирования (рис. 3). Таким образом, в результате корректировки параметров шнека получены следующие результирующие показатели: $Q_M=44,464$ кг/ч; $N=1,4536$ кВт; $R=7,041$ кН; $t_{ш}=4,296$ с; $t_m = 0,461$ с; $S_\sigma=21,291$ МПа·с; $S_\tau=1,689$ МПа·с; $\eta=6,8\%$.

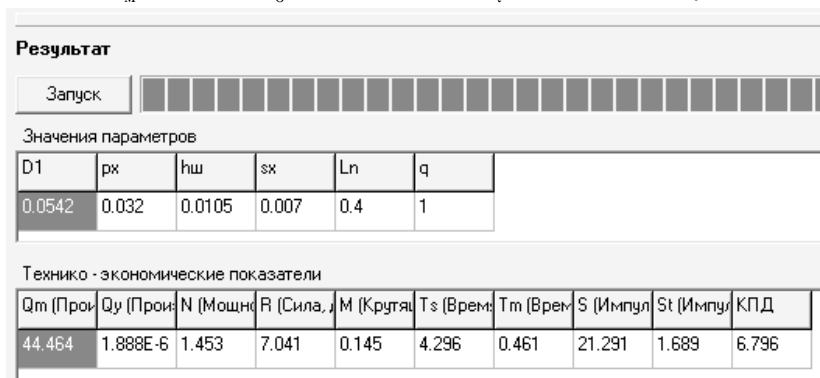


Рис. 3. Результат работы алгоритма

Оценка результатов работы ПС

Верификация выбранной математической модели для ИМ процесса экструдирования проведена в [1, 2]; показано, что расчеты по модели дают не более 3% отклонения от результатов физических экспериментов. Следовательно, можно считать, что выбранная ИМ адекватна реальному процессу экструдирования. Поскольку модель параметрической оптимизации строилась на основе ИМ, то можно сделать вывод, что результирующие значения оптимизации также будут адекватны реальному объекту.

График изменения целевого параметра оптимизации (КПД) в процессе оптимизации приведен на рис. 4. Из графика видно, что в ходе моделирования процесса оптимизации значение КПД возросло от 3,10% до 6,79%, при этом затраченное время составило 180 с, а полученные конструктивные показатели экструдера полностью соответствуют указанным требованиям (граничным условиям параметров).

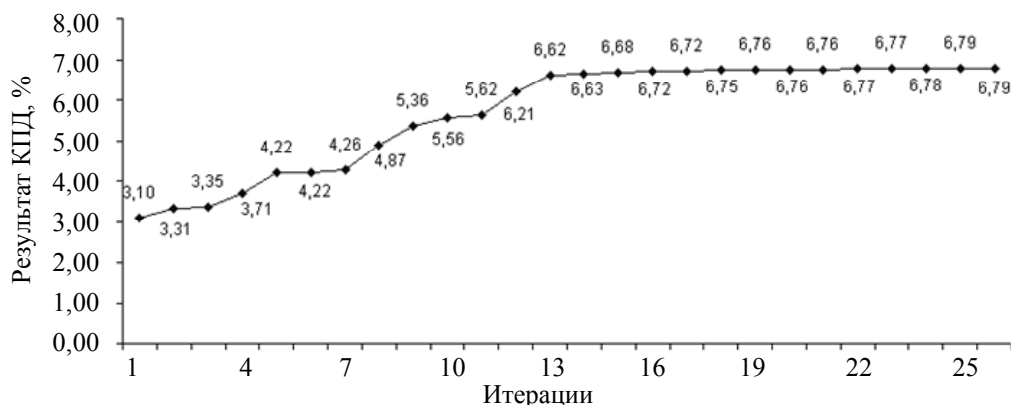


Рис. 4. Этапы работы алгоритма оптимизации

Заключение

Показано, что построенная модель оптимизации позволяет улучшить технико-экономические показатели процесса экструдирования посредством применения найденных геометрических параметров.

Описанная модель, построенная на основе имитационного моделирования процесса экструдирования и использующая эвристические методы поиска, составляет хорошую базу для построения системы автоматизации проектирования экструзионной техники. Программная система может быть использована инженерами-конструкторами для проектирования новых и совершенствования существующих моделей экструзионной техники, а также для проведения научно-исследовательских работ.

Литература

1. Карташов Л.П., Зубкова Т.М. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 225 с.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011612043. Расчет технико-экономических параметров одношнековых экструдеров / Т.М. Зубкова, Н.А. Мустюков, М.А. Корякина. РОСПАТЕНТ № 2010617272. Заявлено 19.11.2010. Оpubл. 05.03.2011.
3. Соколов М.В. Исследование и оптимизация процесса и оборудования экструзии резиновых смесей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. – Тамбов, 2001. – 118 с.
4. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013613270. Оптимизация конструкции одношнекового экструдера адаптивными методами поиска / Т.М. Зубкова, Н.А. Мустюков. РОСПАТЕНТ № 2013610701. Заявлено 06.02.2013. Оpubл. 28.03.2013.

Мустюков Наиль Анварович

– Оренбургский государственный университет, аспирант, 256nail@mail.ru

Зубкова Татьяна Михайловна

– Оренбургский государственный университет, доктор технических наук, профессор, bars87@mail.ru

УДК 629.7.036:621.373

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

Р.М. Мухаметов, О.С. Юльметова, А.Г. Щербак

Приведены результаты разработки технологии формирования функциональных элементов в виде рисунков заданной конфигурации на поверхностях узлов гироскопов из различных материалов на примере деталей, входящих в состав поплавкового гироскопа и феррозондового инклинометра. Рассмотрена возможность использования лазерного маркирования в качестве метода, позволяющего решить задачу формирования функциональных рисунков требуемой формы и контрастности. Представлены режимы и особенности процесса лазерного маркирования поверхностей деталей из хрупких магнитотвердых материалов и хромоникелевых сталей.

Ключевые слова: лазерное маркирование, хрупкие материалы, инклинометр, гироскопические приборы.

Введение

Среди изделий точного приборостроения особое место занимают гироскопические приборы. Они играют важную роль в решении задач ориентации и навигации в таких областях, как авиационная, морская и космическая техника. Среди большого числа типов гироскопов можно выделить поплавковый гироскоп, в состав которого входят магниты, выполненные из хрупких материалов, содержащие функцио-

нальные надписи. Кроме того, в последнее время гироскопические приборы эффективно применяются и в подземной навигации, в частности, для определения траектории ствола скважины при бурении [1]. Для решения задачи определения пространственной ориентации ствола скважины используется инклинометр – прибор для измерения зенитного угла и азимута в отдельных точках скважины, в состав которого входит оптическая шкала, содержащая растровый рисунок требуемой контрастности и конфигурации [2].

Настоящая работа посвящена разработке технологии нанесения функциональных элементов в виде буквенно-цифровых обозначений (надписей) и растровых рисунков на поверхностях узлов гироскопов, разрабатываемых в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» – ведущего предприятия России в области создания средств высокоточной навигации, гироскопии, гравиметрии и морской радиосвязи.

Объекты исследования и постановка задач

Объектами исследований выступают детали гироскопов, выполненные из хрупких магнитных материалов, например, магнит поплавкового гироскопа из сплава ЮН15ДК24, представленный на рис. 1, а, и шкала феррозондового инклинометра из хромоникелевой стали марки 12Х18Н10Т, представленная на рис. 1, б.

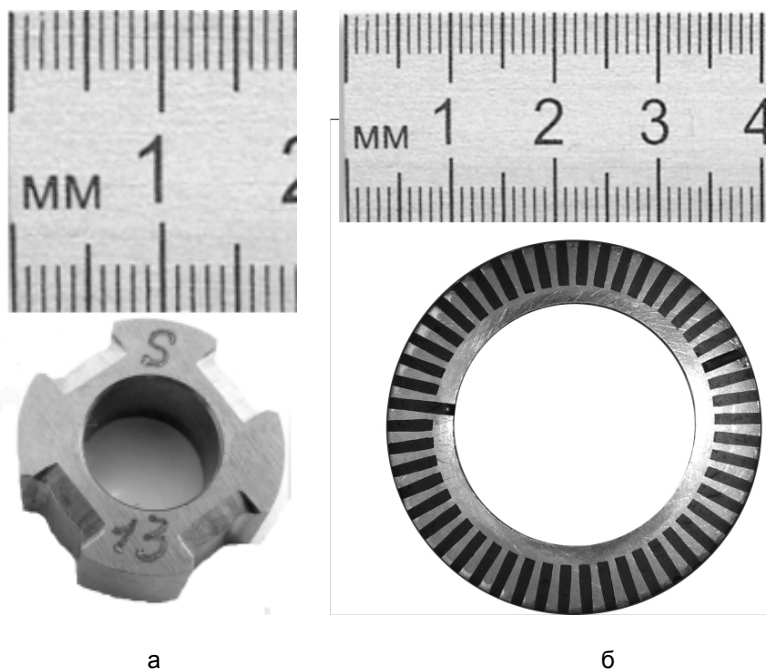


Рис. 1. Магнит поплавкового гироскопа (а); шкала феррозондового инклинометра (б)

Объекты исследований объединяет то, что на их поверхностях имеется определенный функциональный рисунок. Для магнита рисунок представляет собой буквенно-цифровые обозначения полюса магнита и его порядковый номер. Растровый рисунок на кольцевой шкале инклинометра – это совокупность делений, выполненных в виде радиальных рисок с равным угловым шагом при точности в десятые доли градуса и используемых в оптоэлектронной системе съема информационного сигнала датчика угла поворота инклинометра.

До настоящего времени существовали проблемы в технологии нанесения этих рисунков. Так, например, применяемый для магнитных материалов метод электрографической гравировки приводил к появлению сколов и микротрещин на поверхности образцов. Для шкалы инклинометра (рис. 1, б) ранее использовалась технология механической фрезеровки делений с последующей затиркой черной эмалью. К недостаткам такой технологии следует отнести невысокую точность, низкую производительность, большую трудоемкость процесса получения делений на шкалах. Также следует отметить, что инклинометр эксплуатируется в условиях постоянных вибраций и ударов, которые в некоторых случаях могут привести к откалыванию фрагментов растрового рисунка, что негативно сказывается на работе датчика угла поворота инклинометра.

В рамках исследований была поставлена задача разработать технологию создания надписей на магнитных материалах и заменить трудоемкий процесс формообразования делений шкалы инклинометра более высокопроизводительным и точным. В основу технологии, позволяющей решить поставленные задачи, был положен метод лазерного маркирования [3, 4], обеспечивающий возможность формирования рисунка требуемой контрастности, в частности, за счет локального окисления материала покрытия детали, не вызывая ее деформаций [5].

На выбор данного метода повлияли такие преимущества технологии лазерного маркирования, как отсутствие механического контакта, что благоприятно для массового конвейерного производства, адаптивность к потребностям производства, возможность использования практически любых материалов, долговечность нанесенной лазером маркировки, широкие диапазоны варьирования оптического контраста, технологических режимов и т.д. [6].

Перечень экспериментального оборудования

Маркировка функциональных элементов осуществлялась на системе маркировки «Минимаркер 2-М10/20». Общий вид установки представлен на рис. 2, а, где 1 – блок питания и управления лазером; 2 – сканирующая система с оптоволоконном; 3 – рабочий стол с кронштейном для крепления сканирующей системы и возможностью ручного перемещения по вертикальной оси; 4 – управляющий компьютер.

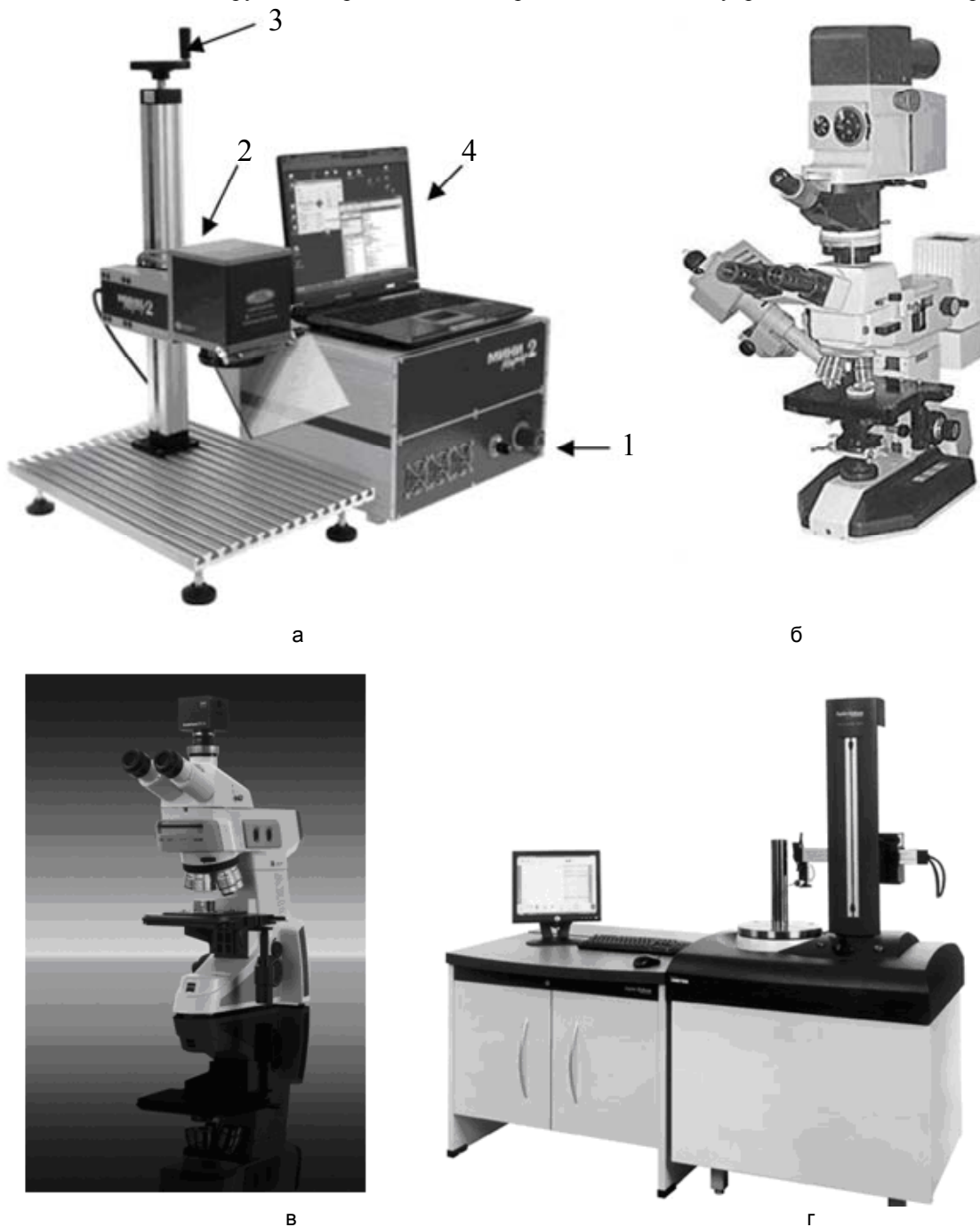


Рис. 2. Экспериментально-исследовательский комплекс оборудования, включающий установку для маркирования «Минимаркер 2- М10/20» (а); спектрофотометр МСФУ-К (б); микроскоп Carl Zeiss Axio Imager (в); профилометр фирмы Taylor Hobson (г)

Представленная система маркировки позволяет управлять следующими параметрами процесса маркирования: мощностью лазерного излучения P , скоростью движения лазерного луча V , плотностью линий N (или числом линий, приходящихся на 1 мм маркируемой поверхности), частотой следования импульсов f , длительностью импульсов τ и числом проходов Q .

Значение каждого из параметров существенным образом влияет на маркируемый рисунок. Мощность лазерного излучения должна обеспечить, в зависимости от поставленной задачи, нагревание поверхности до температуры, необходимой для образования оксидной контрастной пленки на поверхности материала, или же испарения поверхностного слоя. Длительность импульса определяет такие характеристики, как глубина модифицированного слоя, и обратно пропорциональна скорости движения лазерного луча. Частота следования импульсов влияет на температуру материала, которая меняется после окончания каждого импульса. Средняя температура может понижаться, но, если частота следования больше определенного значения, то изменения температуры не наблюдаются, и результат воздействия зависит только от мощности и энергии отдельных импульсов [6].

Оценка контрастности рисунка образцов осуществлялась на спектрофотометре МСФУ-К (рис. 2, б). Принцип работы прибора МСФУ-К основан на том, что свет от источника падает на измеряемую поверхность, отражается и попадает на дифракционную решетку, где разлагается на цветовые компоненты. Блок измерения фиксирует количество отраженной световой энергии сразу в нескольких интервалах. После этого информация преобразуется из аналоговой в цифровую, анализируется и обрабатывается с применением специального программного обеспечения. Важно отметить, что для инклинометра коэффициенты отражения фиксировались в инфракрасном диапазоне.

Оценка структуры полученного рисунка проводилась визуально на микроскопе Carl Zeiss Axio Imager (рис. 2, в).

Контроль формы и шероховатости поверхности меток осуществлялся на профилометре фирмы Taylor Hobson (рис. 2, г).

Разработка технологии гравировки функциональных надписей на деталях и узлах, выполненных из хрупких магнитных материалов

Магнит поплавкового гироскопа выполнен из магнитотвердого сплава на железо-никель-алюминиевой основе – ЮН15ДК24.



Рис. 3. Сравнительный анализ двух методов нанесения надписей на магните: электрографической гравировкой (а); лазерной маркировкой (б)

К буквенно-цифровым обозначениям на магните предъявляются жесткие требования по четкости границ маркировки и отсутствию каких-либо сколов и микротрещин в зоне обработки. При этом допускается рельефный характер данного функционального элемента с глубиной зоны обработки до сотых долей миллиметра. Исследование процесса создания профилированных функциональных элементов на хрупких материалах, каким является сплав ЮН15ДК24, представляет особый интерес, поскольку существенно расширяет возможности использования лазерного маркирования. Физическая сущность процесса лазерного маркирования в рассматриваемом случае заключается в дозированном локальном испарении металла без образования жидкой фазы, т.е. так называемое «чистое» испарение или сублимация [7], что обеспечивалось подбором параметров процесса.

В результате проведенных экспериментов по лазерному маркированию были получены режимы, представленные в табл. 1. Результаты лазерной маркировки магнита показаны на рис. 3.

Мощность лазера P , Вт	Скорость перемещения лазера V , мм/с	Частота следования импульсов f , кГц	Плотность линий N , лин/мм	Длительность импульсов τ , нс
6	700	99	275	100

Таблица 1. Режимы маркирования магнита

На рис. 3 видно, что буквенно-цифровые обозначения, выполненные лазерной маркировкой, более четкие, профиль надписей – равномерный, без наплывов на границах зон обработки. Визуальный контроль не выявил наличия каких-либо дефектов на обрабатываемой поверхности – надпись не имеет сколов и микротрещин.

Разработка технологии нанесения функционального рисунка на шкалу инклинометра

Шкала феррозондового инклинометра, представленная на рис. 4, выполнена из стали марки 12Х18Н10Т. Кольцевая шкала является элементом оптического датчика угла поворота внутренней рамки прибора вокруг своей продольной оси. От точности изготовления растрового рисунка, представляющего собой совокупность радиально ориентированных рисок, непосредственно зависит точность измерений прибора, поскольку при повороте инклинометра вокруг продольной оси из показаний магнитометров могут быть выделены параметры смещенной гармоники, в которых содержится информация о помехе, характеризуемой величиной среднего значения гармоник, и о полезном сигнале. Таким образом, модуляционные развороты позволяют разделить полезный сигнал и помеху [2].

Для шкалы инклинометра требовалось получить на поверхности детали растровый рисунок в виде контрастных черных полос с коэффициентом контрастности не менее 0,5 и с минимально возможными (на уровне единиц микрометра) деформациями поверхности. С точки зрения протекания физических процессов это означает, что лазерное излучение должно иметь такие характеристики, при которых на поверхности детали образуется тонкая оксидная пленка, обеспечивающая получение требуемой цветовой гаммы. Формирование подобной оксидной пленки возможно за счет регулируемых термических процессов взаимодействия лазерного луча с поверхностью стали 12Х18Н10Т. В данном случае наиболее эффективно использовать расчет изобарно-изотермического потенциала химических взаимодействий [8] образования оксидов компонентов стали (оксиды железа, никеля, хрома), получаемое соотношение которых позволяет получить требуемую цветовую гамму и, в конечном счете, необходимый уровень контрастности при минимальном изменении микрорельефа поверхности. В результате проведенных исследований были подобраны режимы маркировки, представленные в табл. 2.

Мощность лазера P , Вт	Скорость перемещения лазера V , мм/с	Частота следования импульсов f , кГц	Плотность линий N , лин/мм	Длительность импульсов τ , нс
2	20	20	500	30

Таблица 2. Режимы маркирования шкалы инклинометра

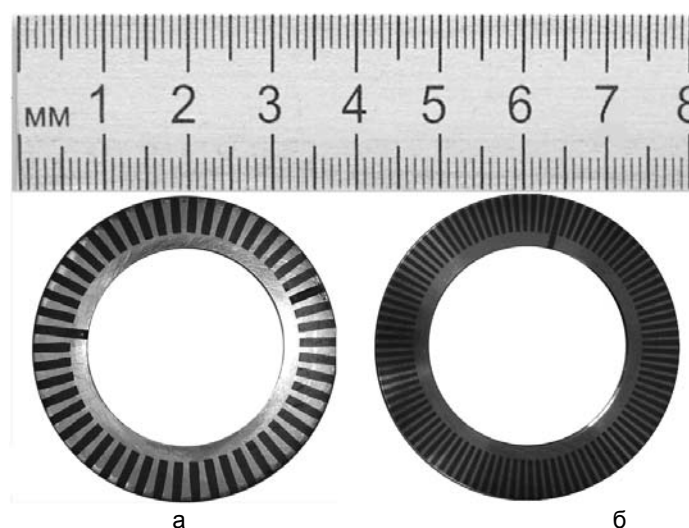


Рис. 4. Шкала инклинометра: по старой технологии (а); по новой технологии (б)

На рис. 4 представлены шкалы, риски на которых были нанесены по старой технологии (фрезерования с последующей затиркой эмалью) и новой – методом лазерного маркирования, который позволил существенно увеличить скорость процесса, улучшить соотношение сигнал/шум при съеме показаний датчика угла за счет увеличения контрастности с 0,5 до 0,8. Также при разработке новой технологии удалось повысить точность съема показаний со шкалы, благодаря увеличению числа делений на шкале с 50 до 100.

Заключение

В рамках проведенных исследований была выявлена принципиальная возможность использования процесса лазерного маркирования для формообразования функциональных элементов в виде надписей и растровых рисунков на поверхностях узлов гироскопов с использованием лазерного гравера «Мини-маркер 2- M10/20».

Результаты исследований показали, что применение метода лазерного маркирования для магнитных и хрупких материалов позволяет формировать четкую, рельефную, контрастную надпись без сколов, микротрещин и наплывов с получением текста равномерного профиля.

Для шкалы инклинометра внедрение технологии лазерного маркирования позволило увеличить скорость технологического процесса. Также в результате экспериментов была обеспечена возможность изменения конфигурации радиально ориентированных рисок шкалы, а именно, внедрение новой технологии позволило увеличить число делений шкалы с 50 до 100, благодаря чему увеличилась точность съема показаний. Подобранные режимы маркировки позволили добиться увеличения контрастности меток с 0,5 до 0,8, что обеспечило повышение уровня полезного сигнала.

Литература

1. Исаченко В.Х. Инклинометрия скважин. – М.: Недра, 1987. – 216 с.
2. Пат. 2291294 РФ, МПК⁶ E21B 47/022, МПК⁶ G01C 9/00, Биндер Я.И., Вольфсон Г.Б., Гаспаров П.М., Геркус А.А., Гутников А.Л., Ключкин П.А., Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Феррозондовый скважинный инклинометр, 17.06.2005, 10.01.2007, Бюл. № 1.
3. Юльметова О.С., Щербак А.Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 28–34.
4. Юльметова О.С. Исследование контрастности лазерных меток на прецизионных металлических поверхностях // Тезисы докладов IX конференции молодых ученых и специалистов. – СПб: ГНЦ ФГУП ЦНИИ «Прометей», 2010. – С. 55.
5. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 50 с.
6. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Лазерная микрообработка. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 111 с.
7. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов: Учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 59 с.
8. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Юльметова Р.Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании растрового рисунка на узлах гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 5 (75). – С. 91–96.

<i>Мухаметов Рустем Маратович</i>	– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, 0189@mail.ru
<i>Юльметова Ольга Сергеевна</i>	– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, olga@yulmetova.ru
<i>Щербак Александр Григорьевич</i>	– ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, вед. научный сотрудник, AScherbak1946@gmail.com

8

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.056

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТЕЙ РЕЧИ СЛОВ ПРЕДЛОЖЕНИЯ В МОРФОЛОГИЧЕСКИХ АНАЛИЗАТОРАХ DLP-СИСТЕМ

С.В. Лапшин, И.С. Лебедев

Предложен метод повышения точности частеречной разбивки слов предложения в морфологических анализаторах DLP-систем. Поставленные эксперименты подтверждают этот факт. При этом метод обладает важным преимуществом – для его работы не требуются предварительно размеченные тексты или иные специально подготовленные данные, за исключением морфологических словарей.

Ключевые слова: частеречная разбивка, автоматическое определение частей речи, морфологический анализ.

Введение

Появление информационных систем, определяющим элементом которых является открытый контур управления, обуславливает необходимость совершенствования и поиска решений, обеспечивающих предотвращение утечек конфиденциальной информации. Учитывая огромный объем документов, циркулирующих в информационно-телекоммуникационных системах, возникает ряд проблемных вопросов, связанных с повышением качества обработки текстовых сообщений системами Data Loss Prevention (DLP). Целесообразность использования того или иного метода зависит от аналитической или синтетической природы естественного языка. Приводимый в работе метод предназначен для текстовой информации, представленной на русском языке.

Ключевой момент в работе DLP-системы – получение вердикта анализатора данных в ответ на запрос: является ли перемещаемая информация защищаемой [1]? Одним из важных этапов в работе анализатора является морфологический анализ передаваемых сообщений. От качества морфологических характеристик разобранных словоформ зависят показатели полноты и точности определения угроз информационной безопасности DLP-системы. Однако автоматический анализ естественного языка, в том числе и морфологический, небезошибочен и многозначен – часто он дает несколько вариантов анализа для одной языковой единицы [2, 3].

Подавляющее число методов автоматической обработки текстовой информации основано на статистической информации. Один из подходов к формализации может быть представлен следующим образом:

- $P(K_i|x)$ – вероятность принадлежности характеристик словоформы к данной части речи K_i ;
- $P(K_i)$ – вероятность появления словоформы, принадлежащей данной части речи.

Связь двух словоформ W_1 и W_2 задает пересечение классов $(K_1 \in K) \cap (K_2 \in K)$, идентифицируемых словоформами. Предпочтение γ класса K_i к классу K_r может быть задано с помощью матрицы потерь, где строки содержат веса при отнесении одного класса к другому:

	K_1	K_2	...	K_m	
K_1	λ_{11}	λ_{11}	...	λ_{11}	
K_2	λ_{11}	λ_{11}	...	λ_{11}	
...	
K_m	λ_{11}	λ_{11}	...	λ_{11}	

(1)

Тогда

$$\gamma = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ii} - \lambda_{ri}) p(x|K_i) P(K_i).$$

Значение потерь λ определяется как функция от частоты встречаемости класса μ . Для линейного классификатора выражение примет вид

$$\lambda = f(K).$$

Увеличение значения γ показывает необходимость включения класса в состав обрабатываемых признаков. Иными словами, для определения правильной гипотезы необходимо учитывать заранее полученную статистическую информацию о сочетаемости частей речи, что является одним из узких мест обработки текстовых сообщений.

В работе описан метод повышения точности автоматического определения частей речи слов в предложении. Особенностью метода является то, что он не требует предварительно размеченных текстов или иных специально подготовленных данных, за исключением словарей морфологических описаний слов.

Место метода в DLP-системе

Рассмотрим множество сообщений D , анализируемых в DLP-системе:

$$D = \{d_i\}, i=1, \dots, n,$$

где d_i – одно из обрабатываемых в защищаемой информационной системе текстовых сообщений.

Пусть $V = \{v_i\}, i=1, \dots, n$ – множество вердиктов, выносимых DLP-системой для каждого из сообщений d_i . В общем случае DLP-система решает задачу классификации каждого из сообщений d_i множества D для вынесения вердикта v_i о возможности дальнейшей обработки:

$$F_{DLP}(d_i) = v_i.$$

Необходимо отметить, что здесь и в дальнейшем в работе рассматриваются лингвистический анализ и лингвистическая классификация обрабатываемых сообщений для DLP-систем.

Рассмотрим задачу классификации как упорядоченную композицию функций

$$F_{DLP} = F_m \circ F_{m-1} \circ \dots \circ F_2 \circ F_1,$$

где в зависимости от функционального наполнения DLP-системы функции F_j могут обозначать: F_1 – графематический анализ, F_2 – морфологический анализ, F_3 – синтаксический анализ, F_4 – семантический анализ и т.д. Каждая из функций F_j выполняется на одном из этапов анализа сообщения.

Второй этап – морфологический анализ (F_2) – разделяется на подэтапы:

$$F_2 = F_{2k} \circ F_{2k-1} \circ \dots \circ F_{22} \circ F_{21}.$$

В зависимости от реализации этап частеречной разбивки обычно является первым (F_{21}), поэтому ошибки на этапе частеречной разбивки анализируемых сообщений могут быть критическими. Следовательно, качество лингвистического анализа в DLP-системах существенно зависит от достигаемых показателей качества на этапе выполнения F_{21} .

Таким образом, задача повышения качества определения частеречных характеристик слов обрабатываемого сообщения важной для повышения показателей качества фильтрации DLP-систем.

Суть метода

Предлагаемый метод разметки слов предложений по частям речи основывается на использовании некоторого множества известных, заранее корректных последовательностей признаков части речи (множество корректных шаблонов) для аналогичных предложений. Аналогичным в данном случае является предложение, имеющее одинаковую длину и последовательность частей речи с анализируемым. Выбор одной из гипотез определяется наличием ее во множестве известных. При этом если в известном множестве содержится более одной гипотезы для анализируемого предложения, то выбирается наиболее часто встречающаяся. Важной особенностью метода является то, что необходимое для работы множество корректных шаблонов формируется автоматически на основе специально подготовленного морфологического словаря и не требует предварительно размеченных текстов.

Предлагаемый метод состоит из следующих частей:

- формирование множества корректных шаблонов предложений;
- формирование множества гипотез о признаках части речи слов в предложении;
- поиск во множестве корректных шаблонов каждой из гипотез;
- выделение одной из гипотез на основе результатов поиска.

Формализация задачи представлена следующим образом.

Пусть $S = \{s_i\}, i=1, \dots, n$ – множество корректных шаблонов предложений. Пусть $H = \{h_i\}, i=1, \dots, m$ – множество гипотез о признаках части речи слов анализируемого предложения. Пусть R – правильное описание анализируемого предложения с точки зрения признаков части речи его слов. Тогда решаемая задача состоит в том, чтобы выбрать такое $h_j \in H$, что $h_j = R$.

При этом важными подзадачами являются формирование множества корректных шаблонов S и поиск h_i в множестве S .

Формирование множества корректных шаблонов предложений

Сформировать достаточное множество корректных шаблонов вручную не представляется возможным. Если рассматривать 14 частей речи и только предложения длиной до 10 слов, то мощность множества S , необходимого для анализа таких предложений, можно грубо оценить по следующей формуле:

$$|S_{10}| = \sum_{i=1}^{10} 14^i \approx 3 \cdot 10^{11}. \quad (1)$$

Очевидно, что корректно разметить такое или сравнимое с таким число предложений за разумное время невозможно. Автоматическое решение этой подзадачи «напрямую» сталкивается с исходной решаемой проблемой – с проблемой точности автоматического определения частей речи в предложениях.

Для решения этой подзадачи была использована следующая идея. Искомое множество S можно формировать на основе предложений, состоящих только из однозначных с точки зрения признаков части речи слов.

Таким образом, процесс формирования множества корректных шаблонов предложений состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Формирование морфологического словаря, в котором исключены все омонимы.

Шаг 2. Определение предложений, состоящих только из полученных на шаге 1 слов.

Шаг 3. Создание шаблонов на основе полученных на шаге 2 предложений.

Шаг 4. Добавление полученных шаблонов в искомое множество.

На шаге 1 для каждой словоформы в словаре ищется совпадающая с ней, но отличающаяся морфологическим описанием. Если найдены совпадающие словоформы, у которых отличается часть речи, то эта словоформа не добавляется в словарь. Те словоформы, которые имеют единственное морфологическое описание (или часть речи во всех случаях одинакова), попадают в создаваемый словарь.

Шаги 2–4 являются сугубо техническими и не представляют интереса.

Описанный способ дает возможность получить необходимое множество S автоматически, без использования предварительно размеченных текстов. Таким образом, реализуется первая часть предлагаемого метода.

Следующей подзадачей является формирование множества гипотез H о признаках части речи слов в предложении. Для этого для каждого слова в предложении из словаря извлекается список возможных частей речи. Далее с помощью перестановки возможных частей речи для каждого слова формируется искомое множество H .

Поиск в множестве корректных шаблонов каждой из гипотез

Полученное в первой части множество корректных шаблонов S предложений достаточно велико (1). Поиск перебором в таком множестве будет крайне неэффективен. В связи с этим предлагается организовать хранение множества корректных шаблонов с помощью словаря.

В нашей реализации описываемого метода шаблон предложения s_i представляет собой последовательность чисел, т.е. части речи кодируются числами: $s_i = \{m_i\}$, $i=1, \dots, n$, m_i – закодированная часть речи i -го слова в предложении.

В качестве примера можно рассмотреть шаблон, полученный из предложения «Дорожка вела к амбару.» из произведения «Война и мир» Л.Н. Толстого. В нашем случае кодирование выполнялось следующим образом (таблица).

Часть речи	Код
Существительное	0x0001
Глагол	0x0002
...	
Предлог	0x0200

Таблица. Кодирование частей речи числовыми значениями

Таким образом, шаблон, полученный из указанного выше предложения, имеет вид

$$s = \{1, 2, 512, 1\}.$$

Для организации хранения и поиска по большому числу таких числовых последовательностей был выбран словарь неограниченной вложенности, где на каждом уровне ключом является код части речи, а значением – кортеж из словаря следующего уровня и числа, означающего количество встреч предложения с частями речи, которые были закодированы использованными числами:

$$S[m_1] [m_2] \dots [m_n] = (S_{n+1}, N),$$

где S_{n+1} – словарь следующего уровня вложенности, а N – число встреч шаблона s_i . Такая структура хранения довольно проста в реализации и использовании и позволяет выполнять поиск по большому числу шаблонов предложений с приемлемой скоростью, что подтверждается экспериментом.

Выделение одной из гипотез на основе результатов поиска

Поиск каждой из гипотез h_i во множестве известных шаблонов S может привести к трем различным исходам:

- $H \cap S = \emptyset$ – в имеющемся множестве корректных шаблонов не найдено ни одной гипотезы;
- $H \cap S = \{h_j\}$ – в имеющемся множестве корректных шаблонов найдена одна гипотеза;
- $H \cap S = \{h_j \dots h_k\}$ – в имеющемся множестве корректных шаблонов найдено несколько гипотез.

Большое число результатов первого исхода говорит о том, что имеющегося множества корректных шаблонов недостаточно, и требуется его пополнение. В случае второго исхода единственная найденная гипотеза h_j считается верной. В случае третьего исхода выбирается гипотеза, которая встречалась наиболее часто. Полученная в результате гипотеза h_j является в среднем более корректной, чем случайно выбранная из исходного множества H . Это подтверждается экспериментом.

Эксперимент

Описанный метод был реализован и встроен в подсистему определения частей речи слов в предложении. Эффективность метода оценивалась сравнением результатов работы подсистемы с заведомо корректными на размеченных вручную текстах.

В качестве первого источника размеченных текстов изначально был выбран Национальный корпус русского языка [4]. Но он не подошел из-за большого числа использованных там «композитивных» частей речи, например: «местоимение–существительное», «местоимение–прилагательное», «числительное–прилагательное» и т.д. Поскольку в используемом нами словаре такие «части речи» не используются, статистика получалась искаженной, и для сравнения был выбран Открытый корпус русского языка [5].

Сравнение производилось на случайной выборке 115 размеченных вручную текстов Открытого корпуса русского языка. В ходе каждого опыта сравнивалось 15252 слова в 2057 предложениях.

На рис. 1 показана зависимость качества анализа в процентах от количества использованных при анализе шаблонов предложений.

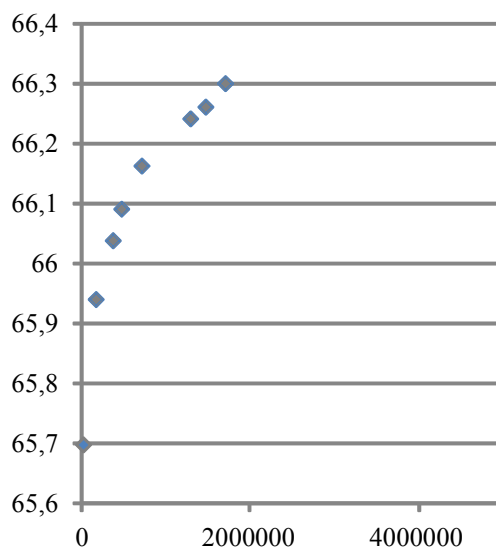


Рис. 1. Зависимость процента корректно определенных частей речи (по оси ординат) от числа шаблонов предложений, использованных при анализе (по оси абсцисс)

При этом имеющееся множество шаблонов далеко от насыщения. На рис. 2 показана зависимость количества полученных шаблонов от числа разобранных текстов.

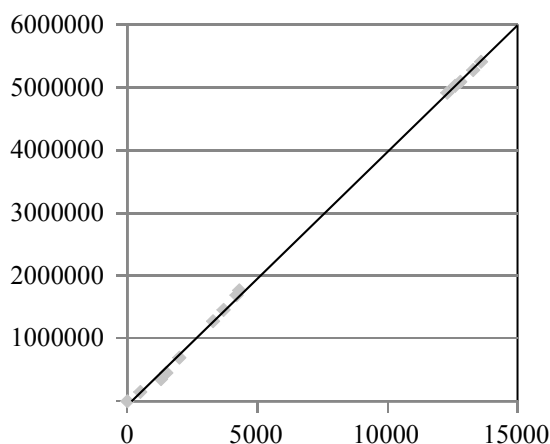


Рис. 2. Зависимость количества полученных шаблонов (по оси ординат) от числа разобранных текстов (по оси абсцисс)

По графику видно, что число шаблонов линейно возрастает в зависимости от числа разобранных текстов, что говорит о возможности улучшения полученных нами параметров. По приблизительной оценке при мощности множества шаблонов $\sim 10^9$ можно ожидать повышение качества разбора на 10–12%.

Полученная на выходе системы гипотеза является в среднем более корректной, чем случайно выбранная из исходных. Иными словами, число верных совпадений частей речи слов в предложении выше, чем у случайно выбранной гипотезы, что подтверждено экспериментом.

Заключение

Описанный в работе метод позволяет повысить точность автоматического определения частей речи слов в предложении. Поставленные эксперименты подтверждают этот факт. При этом метод обладает важным преимуществом – для его работы не требуются предварительно размеченные тексты или иные специально подготовленные данные, за исключением словарей морфологических описаний слов. При этом остается достаточно много возможностей для доработки метода. В частности, видится полезным учет знаков препинания и отдельных словосочетаний [6]. Улучшение указанной характеристики позволяет повысить качество морфологического анализа в DLP-системах, что, в свою очередь, приводит к повышению защищенности таких систем.

Работа выполнена в рамках НИР №12360.

Литература

1. Левцов В.Ю. Контроль подмены символов в системах борьбы с утечками конфиденциальных данных // «Information Security/ Информационная безопасность» – 2009. – № 5. – С. 19–22.
2. Боярский К.К., Каневский Е.А. Разработка инструментария для полуавтоматической морфологической разметки текста // Труды международной конференции «Корпусная лингвистика – 2008». – СПб: СПбГУ, Факультет филологии и искусств, 2008. – С. 83–88.
3. Боярский К.К., Каневский Е.А., Стафеев С.К. Использование словарной информации при анализе текста // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 87–91.
4. Национальный корпус русского языка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ruscorpora.ru/corpora-usage.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 17.02.2013).
5. Открытый корпус русского языка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencorpora.org/dict.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 17.02.2013).
6. Кобзарева Т.Ю., Афанасьев Р.Н. Универсальный модуль предсинтаксического анализа омонимии частей речи в РЯ на основе словаря диагностических ситуаций // «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии». Труды международного семинара «Диалог'2002». – М.: Наука, 2002. – Т. 2. – С. 258–268.

Лапшин Сергей Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sv.lapshin@gmail.com

Лебедев Илья Сергеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, доцент, lebedev@cit.ifmo.ru

УДК 004.89, 004.942

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СРЕДА ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ «БЕЗОПАСНЫЙ ВИРТУАЛЬНЫЙ РЕГИОН»¹

А.В. Маслобоев

Для информационной поддержки принятия решений и повышения уровня координации субъектов региональной безопасности разработан прототип сетевентрической мультиагентной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью «Безопасный виртуальный регион» с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Ядро и компоненты распределенной информационной среды образуют иерархическое виртуальное пространство региона как интеграционную площадку для проблемно-ориентированных ситуационно-коалиционных мультиагентных систем поддержки управления рискоустойчивым региональным развитием.

Ключевые слова: мультиагентные технологии, региональная безопасность, управление, информационно-аналитическая поддержка, онтологии, полимодельные комплексы, виртуальное пространство региона.

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений государственной политики Российской Федерации (РФ) в Арктике, согласно «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [1], является развитие сферы информационных технологий и связи. Реализация Арктической стратегии по данному направлению предполагает создание ком-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №12-07-00138 «Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью арктических регионов России»)

плексной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры для поддержки управления рискоустойчивым развитием территорий Арктической зоны РФ и входящих в ее состав регионов. Однако анализ мер, осуществляемых РФ по развитию сферы информационных технологий для задач обеспечения различных видов безопасности (социально-экономической, промышленно-экологической, кадровой и т.д.) в Российской Арктике, свидетельствует о том, что их эффективность существенно снижается в результате возникновения ряда проблем, связанных с:

- отсутствием современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, позволяющей осуществлять оказание услуг связи населению и хозяйствующим субъектам на всей территории Арктической зоны РФ;
- необходимостью интеграции, обработки и анализа большого объема разноплановой информации для различных министерств и ведомств;
- необходимостью обеспечения согласованности информационного взаимодействия субъектов и структур безопасности в едином информационном поле (использование унифицированного регламента взаимодействия в распределенной среде);
- ограниченным доступом к территориально-распределенным источникам проблемно-ориентированной информации, необходимым для оперативной поддержки принятия решений в сфере управления безопасностью в кризисных ситуациях, ввиду организационной разнородности (различной ведомственной принадлежности) субъектов безопасности;
- отсутствием целостной информационно-аналитической среды для комплексного решения задач управления глобальной безопасностью арктических регионов, позволяющей повысить оперативность, достоверность и качество выдаваемой информации об обстановке в Арктической зоне РФ.

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых и развитие существующих методов и технологий динамического формирования и конфигурирования расширяемой многофункциональной информационно-аналитической инфраструктуры безопасности арктических регионов РФ [2], подверженных влиянию множества разнородных внутренних и внешних факторов, а также наделенной потенциалом к саморазвитию и самоорганизации.

Информационно-аналитическая среда поддержки управления глобальной безопасностью арктических регионов представляет собой комплекс проблемно-ориентированных, взаимосвязанных и взаимодействующих информационных и аналитических ресурсов и систем, а также технологическую и организационную инфраструктуру их создания и использования. Ввиду разнородности и динамичности ее компонентов информационная поддержка проблемно-ориентированной деятельности субъектов региональной безопасности в целях повышения эффективности согласованного по времени, ресурсам и специфике ситуации информационного взаимодействия организационных структур безопасности представляется сложной проблемой, требующей научной проработки для получения комплексного решения.

Отечественных и зарубежных аналогов, комплексно решающих описанные выше проблемы, в ходе исследований не выявлено. Существующие разработки в сфере организации распределенных информационно-аналитических сред требуют детального пересмотра, переработки и адаптации, так как не учитывают существенных особенностей, связанных с условиями применения информационных технологий в Арктической зоне РФ. Современные отечественные и зарубежные системы информационной поддержки управления глобальной безопасностью регионального развития разрабатываются, как правило, под конкретные задачи [3] – например, связанные с метеорологией, энергетикой, морской деятельностью или экологией.

В настоящей работе представлены архитектура и особенности программно-алгоритмической реализации сетевидной мультиагентной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью «Безопасный виртуальный регион» (МИАС БВР) с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Новизна предлагаемых технологических решений, заложенных в МИАС БВР, заключается в разработке и реализации метода и основанной на нем когнитивной мультиагентной технологии виртуализации процессов управления региональной безопасностью, что обеспечило возможность адаптивного моделирования целенаправленной деятельности субъектов безопасности и формирования проблемно-ориентированных виртуальных пространств как ситуационно-коалиционных мультиагентных систем (МАС) информационной поддержки управления региональной безопасностью в кризисных ситуациях.

Актуальность и высокая значимость результатов исследований, представленных в настоящей работе, для экономики и обороноспособности страны подтверждаются рядом принятых Правительством РФ нормативных документов, в частности:

- «Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» (утверждено Указом Президента РФ 18.09.2008 г. Пр-1969) [4];
- «Стратегия национальной безопасности РФ до 2020 года» (утверждено Указом Президента РФ 12.05.2009 г. №537) [5];
- «Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» (утверждено Указом Президентом РФ 20.02.2013 г., Пр-232) [1].

Особенности технологической реализации МИАС БВР

Специфическими особенностями синтезируемой МИАС БВР являются: мультиагентная реализация, сетевая организация, децентрализация функций управления, наличие средств интеграции разнородных информационных и исполнительных ресурсов, синергетические и когнитивные свойства (самоорганизация компонентов на основе коалиционных взаимодействий когнитивных агентов и адаптация к динамике внешней среды).

В качестве технологической основы для практической реализации и развертывания МИАС БВР, обеспечивающей возможность адаптации к динамичному характеру функционирования внешнего и внутреннего окружения региона, согласно работе [6], в ходе исследований предложено использовать современные технологии одноранговых мультиагентных распределенных информационных систем, принципы сетецентрического управления и синергетического подхода.

Сетецентрический подход [7, 8] обеспечивает создание общего информационного поля (целостной виртуальной среды) для интеграции функционального и вычислительного потенциала разнородных проблемно-ориентированных информационных систем при решении задач управления сложными динамическими системами. Основу сетецентрического подхода к проектированию распределенных информационных систем составляет сервис-ориентированная архитектура (Service-Oriented Architecture, SOA) [9]. Реализация принципов сетецентрического управления в распределенных информационных системах обеспечивает эффективное взаимодействие многопрофильных подсистем сильносвязанных стационарных и (или) мобильных объектов с программируемым поведением в единой информационной среде. Основу сетецентрического управления составляют сквозные модели систем объектов, взаимодействующих в едином информационном пространстве, в котором в реальном времени и с высокой надежностью обеспечивается циклическое повторение всех этапов исполнения различных контуров управления.

Синергетический подход [10] к управлению сложными открытыми нелинейными системами, характеризующимися свойствами неустойчивости, неравновесности, бифуркаций, катастроф и самоорганизации, рассматривается как дальнейшее развитие системного подхода и обеспечивает новые возможности для исследования и осуществления управленческой деятельности в открытых виртуальных информационных системах. Реализация синергетического подхода к управлению в МАС заключается в формировании коалиций агентов в результате самоорганизации и коллективной адаптации агентов к изменяющимся условиям среды. Эволюция МАС за счет внутренних механизмов самоорганизации ее активных элементов (агентов) – проявление синергетического эффекта. Это обеспечивает возможность перехода от закрытых иерархических структур с жесткими связями и централизованным управлением к открытым сетевым виртуальным организационным структурам с гибкими связями и децентрализованным управлением.

Применение мультиагентного подхода [2] для задач управления рискоустойчивым региональным развитием позволяет создать адекватную информационно-аналитическую среду поддержки управления региональной безопасностью, учитывая распределенность, динамичность и структурную сложность региональных компонентов. При таком подходе представляется возможность реализовать виртуализацию функций управления отдельными составляющими региональной безопасности за счет делегирования их когнитивным агентам, а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов можно будет обеспечить эффективное функционирование самоорганизующегося виртуального пространства региона и его компонентов, а также поддержание допустимого уровня безопасности развития на перспективу. Согласно [11], формирование коалиций агентов – это один из подходов конфигурирования виртуальных организационных структур безопасности под конкретную задачу управления безопасностью региона посредством применения согласованных стратегий, временная логика которых зависит от динамически меняющихся условий.

Архитектура МИАС БВР

В ходе исследований предложена многоуровневая информационно-технологическая модель МИАС БВР и технология динамического конфигурирования ее компонентов для задач управления региональной безопасностью.

Логическая архитектура МИАС БВР (рис. 1) включает четыре основных уровня.

1. *Пользовательский уровень* или *уровень прикладных задач* ассоциируется с объектами реального мира и представлен конкретными субъектами регионального управления и организационными структурами безопасности, в том числе и хозяйствующими субъектами, профиль деятельности которых связан с решением задач освоения и развития арктических территорий.
2. *Прикладной уровень* содержит интегрируемые в рамках единой виртуальной среды безопасности ведомственные информационные системы и веб-ресурсы арктической тематики, а также ассоциируемые с ними инструментальные средства и активные программные приложения (когнитивные агенты), ориентированные на решение различных классов задач управления безопасностью. Данный уровень является собой границу перехода между объектами реального мира и их отображением в виртуальное

пространство. Точка входа в виртуальное пространство выполняет не только функцию интеграционной площадки компонентов МИАС БВР, но и обеспечивает унифицированный доступ к информационно-аналитическим ресурсам и сервисам МИАС БВР.

3. *Сервисный уровень* включает множество информационных и веб-сервисов, а также общесистемных служб, предоставляемых в МИАС БВР с помощью специальных программ, в том числе и программных агентов. Построение архитектуры МИАС БВР на основе сервис-ориентированного подхода обеспечило реализацию принципа агентной ориентации МИАС БВР. Данный подход заключается в использовании в качестве компонентов проблемно-ориентированных распределенных информационных систем, образующих инфраструктуру МИАС БВР, мобильных программных агентов, автономно функционирующих в МИАС БВР и обладающих целенаправленным поведением.
4. *Ресурсный уровень* объединяет в себе множество информационных, аналитических и вычислительных ресурсов, необходимых для комплексного решения задач управления региональной безопасностью. На данном уровне могут также содержаться древовидные концептуальные модели различных предметных областей, практически реализуемые в виде прикладных онтологий или баз знаний, используемых в качестве моделей представления знаний в составе интегрируемых в МИАС БВР интеллектуальных систем поддержки принятия решений и экспертных систем.

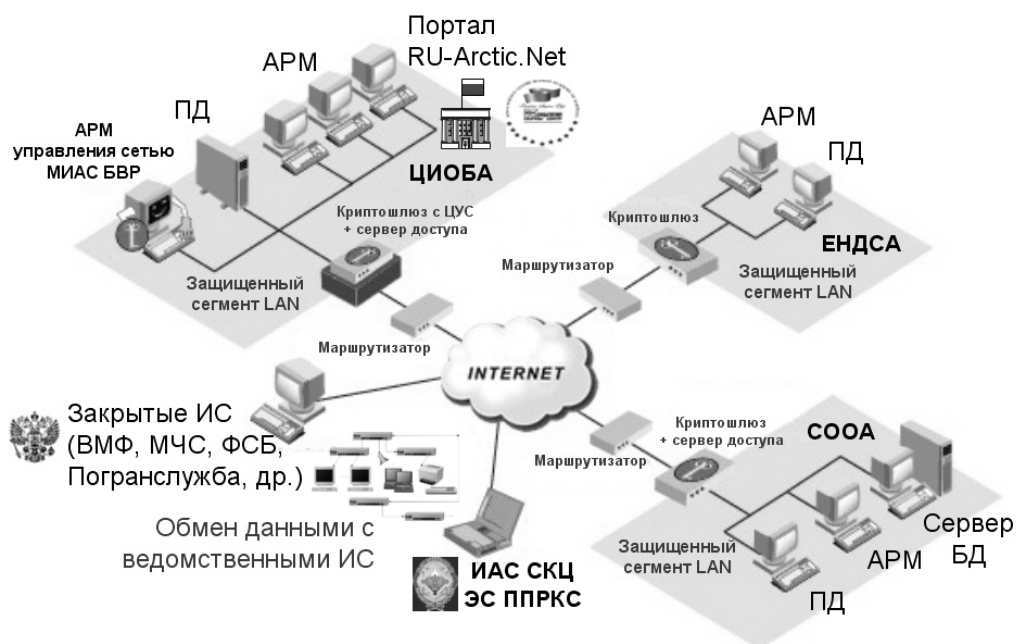


Рис. 1. Логическая архитектура МИАС БВР: АРМ – автоматизированное рабочее место; ПД – поставщик данных; БД – база данных; ИС – информационная система; ЦУС – центральный управляющий сервер; ИАС – информационно-аналитическая система; СКЦ – ситуационно-кризисный центр; ЭС ППРКС – экспертная система поддержки принятия решений в кризисных ситуациях; ЦИОБА – Центр исследований и обеспечения безопасности в Арктике; ЕНДСА – Единая национальная диспетчерская служба в Арктике; СОАА – система освещения обстановки в Арктике

Динамическое конфигурирование МИАС БВР и самоорганизация ее компонентов являются необходимым и достаточным условием для поддержания ее работоспособности и саморазвития в открытой гетерогенной распределенной информационной среде. Эффект, получаемый от использования МИАС БВР, тем выше, чем больше и содержательнее ее внутренний объем – количество зарегистрированных разнотипных агентов субъектов безопасности, веб-сервисов, подключенных узлов, включающих информационные и аналитические ресурсы, интегрированных ведомственных информационных систем и т.д. Однако рост объема системы естественным образом приводит к возрастанию сложности задач поиска информационных элементов и сервисов, композиции вариантов виртуальных организационных структур безопасности из-за полиномиального роста количества альтернатив. Для того чтобы система не теряла работоспособность в условиях собственного неограниченного роста, необходимы специальные механизмы самоорганизации, позволяющие динамично формировать ее внутреннюю структуру с целью сокращения объемов обрабатываемых и передаваемых по коммуникационным линиям данных в ходе регистрации новых информационных ресурсов и веб-сервисов в системе, поиска агентов совместной деятельности на распределенных узлах, оценки их компетенций с последующим формированием коалиций, а также синтеза потенциально эффективных конфигураций виртуальных организационных структур безопасности. Для решения этой задачи в ходе исследований разработан метод самоорганизации когнитив-

ных программных агентов [12], повышающий эффект от реализации модели самоорганизации на основе градиентных (вычислительных) полей, описание которой представлено в работах [13, 14]. Самоорганизация агентов заключается в автоматическом формировании в рамках МИАС БВР проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, объединяющих агентов с близкими целями и требуемым набором компетенций в коалиции, и генерации управляющих агентов для каждого виртуального пространства, реализующих процедуры распределения задач, координации процессов межкоалиционной миграции агентов и реорганизации МАС, выдачи удостоверяющих сертификатов и т.д.

Общая характеристика и средства реализации базовых программных компонентов МИАС БВР

МИАС БВР, основанная на разработанных в ходе исследований проблемно-ориентированных когнитивных моделях и информационных технологиях, представлена следующими практическими разработками.

1. *Распределенная агентная платформа* [15], представляющая собой совокупность функциональных модулей, обеспечивающих создание и использование полимодельных комплексов поддержки управления безопасностью, а также компонентов среды исполнения и поддержки функционирования когнитивных программных агентов в распределенной информационной среде. В рамках агентной платформы реализуется информационная технология дистанционного формирования моделей и управления процессом имитационного моделирования, обеспечивающая синтез имитационных моделей сложных систем на базе системно-динамических моделей их типовых составляющих – модельных шаблонов. Это позволяет расширять состав полимодельных комплексов для их последующего использования в процессе реализации аналитических, прогностических и когнитивных (познавательных) функций агентов системы.

Специализированными компонентами распределенной агентной платформы являются:

- средства формирования отдельных подмоделей с помощью разных методов моделирования и их интеграции в общий полимодельный комплекс;
- средства, обеспечивающие согласование и выбор общесистемного шага моделирования для различных подмоделей;
- процедуры формирования и исполнения подмоделей внутри имитационного аппарата когнитивных агентов;
- средства автоматизированной обработки результатов моделирования;
- средства интеграции (консолидации) результатов моделирования в разрезе конкретной решаемой задачи.

Архитектура агентной платформы включает функциональные модули, реализующие внутреннюю логику функционирования агентов, протоколы межагентных коммуникаций, а также процедуры формирования коалиций агентов и модели управления их совместной деятельностью, средства обеспечения информационной безопасности агентов и данных, которыми они оперируют, алгоритмы миграции агентов, средства интеграции разнородных информационных ресурсов.

2. *Сетецентрическая мультиагентная система информационно-аналитической поддержки управления региональной безопасностью*, представляющая собой множество взаимосвязанных активных программных компонентов, реализующих функции разнотипных агентов субъектов безопасности в виртуальной среде, общесистемных сервисов (сервис онтологий, сервис центров сертификации агентов и др.), а также специализированных системных служб, обеспечивающих интеграцию в систему разнородных информационных ресурсов. Для уменьшения нагрузки на информационно-коммуникационную инфраструктуру в ходе межагентных коммуникаций и обмена данными в системе используются два типа агентов – мобильные агенты, способные перемещаться между узлами виртуальной среды для реализации локального поиска и обработки данных в пределах того или иного узла, и статические агенты, технически реализуемые в виде локальных программ (.exe) или веб-сервисов. В качестве технологии реализации распределенной мультиагентной среды использована технология CORBA. Базовые шаблоны программных агентов системы разработаны с помощью языка Java на базе платформа JADE (Java Agent Development Environment) [16], поддерживающей стандарты FIPA-OS (Foundation for Intelligent Physical Agents) [17] для реализации интеллектуальных агентов, в соответствии с методологией проектирования многоагентных систем GAIA [18]. В качестве дополнительных средств для разработки спецификаций когнитивных агентов и их настройки на предметную область использованы инструментальные средства AgentBuilder [19] и Cougaar (Cognitive Agent Architecture) [20].

3. *Интегрированный арктический Интернет-портал RU-Arctic* (www.ru-arctic.net), представляющий собой мультипредметный веб-ресурс и обеспечивающий унифицированную точку доступа к ресурсам МИАС БВР на основе веб-технологий.

При создании данного веб-ресурса использовались язык PHP, СУБД MySQL и технология Ajax. В качестве программного обеспечения, позволяющего управлять содержимым и структурой сайта, ис-

пользована CMS-система WordPress. Для работы с картографическими источниками данных (интерактивными электронными картами) и визуализации пространственной информации с территориальной привязкой в рамках портала использован веб-ориентированный картографический сервер с открытым исходным кодом – GeoServer [21], предоставляющий доступ к открытым геоинформационным веб-сервисам. Принципы построения и функциональной организации веб-ориентированных геоинформационных систем изложены в работе [22].

Мультипредметная сущность портала [23] обеспечивает возможность его использования различными категориями пользователей независимо от профиля их деятельности и основывается на технологиях Sematic Web. Мультипредметность позволяет адаптировать систему под разнородных пользователей [24]. Для этого в качестве моделей представления знаний в рамках системы используются онтологии различных предметных областей и ассоциированных с ними разнородных информационных ресурсов, а также средства их интеграции [25].

4. *Комплекс проблемно-ориентированных имитационных моделей*, образующих полимодельные комплексы, используемые агентами системы в качестве аналитических ресурсов в составе своего имитационного аппарата [26] для реализации прогностических функций и пополнения знаний о среде функционирования (когнитивная функция агентов). Для разработки системно-динамических и агентных моделей использовались инструментальные среды моделирования PowerSim [27] и Anylogic [28] соответственно.
5. *Онтология региональной безопасности*, построенная на основе разработанной формальной концептуальной модели интегрированной информационной среды поддержки управления глобальной безопасностью региона [29] и используемая в качестве базы знаний агентов системы. Онтология задает интеллектуальность когнитивного агента – чем точнее составлена онтология, чем более корректно обозначены связи, тем полнее агент представляет предметную область, для которой он существует. Созданная онтология реализована в терминах языка онтологического моделирования OWL. Так как разработка агентов системы выполнялась на базе платформы JADE, то для обеспечения возможности агентов работы с прикладными онтологиями использовалась специальная библиотека AgentOWL. Она обеспечивает создание и использование RDF/OWL-онтологий в качестве моделей знаний агентов.

Функциональные возможности МИАС БВР дополняют интегрированные в ее состав прикладные пакеты программ и инструментальные средства, созданные в Институте информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН, а именно: программная система информационного обеспечения кадровой безопасности региона на основе управления качеством высшего образования, программный комплекс автоматизации синтеза имитационных моделей сложных динамических систем, информационная система оценки экономических рисков сценариев развития моногорода и программная мультиагентная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности.

В совокупности данные практические разработки обеспечивают построение расширяемой многофункциональной виртуальной сетцентрической среды, образующей целостную информационно-аналитическую инфраструктуру безопасности региона на базе существующих и вновь создаваемых проблемно-ориентированных информационных ресурсов и систем, а также средств автоматизированной обработки содержащихся в них данных.

Области применения результатов исследований

Синтезируемое на основе реализованных в рамках МИАС БВР методов и технологий виртуальное пространство региона – следующий этап на пути создания компьютерных тренажеров для чиновников, менеджеров, системных аналитиков, военных, предназначенных для интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению рискоустойчивым региональным развитием.

Основное назначение МИАС БВР – удовлетворение информационных потребностей и обеспечение согласованного информационного взаимодействия субъектов и организационных структур безопасности посредством оперативного и своевременного предоставления соответствующих информационных ресурсов (данных) и сервисов для решения задач управления региональной безопасностью. Средством коммуникации субъектов безопасности с МИАС БВР и друг с другом являются их онлайн-автоматизированные рабочие места и их виртуальные представители в МИАС БВР – когнитивные программные агенты соответственно, функциональная структура и компонентный состав которых непосредственно и взаимно влияют на архитектуру и функционирование МИАС БВР. Доступ к ресурсам МИАС БВР и виртуальное сотрудничество субъектов безопасности в единой информационной среде осуществляется через унифицированную точку доступа, реализованную в виде интегрированного Арктического Интернет-портала RU-Arctic (www.ru-arctic.net), представляющего собой мультипредметный веб-ресурс, в рамках которого представляется возможным связать действующие системы ситуационно-кризисных и когнитивных центров управления безопасностью в Арктике, а также интегрировать в единое целое разнооб-

разные информационные и аналитические ресурсы арктической направленности. Функциональная структура и компоненты системы RU-Arctic представлены на рис. 2.

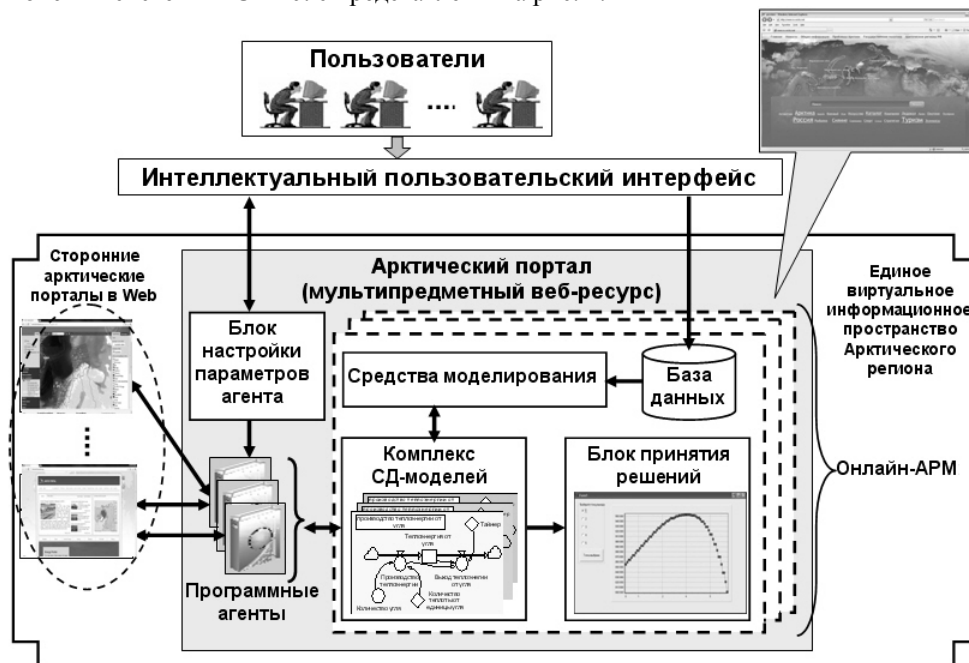


Рис. 2. Функциональная структура и компоненты системы RU-Arctic.net

Каждый субъект региональной безопасности имеет возможность создать в системе одного или нескольких программных агентов, которые представляют его компетенции в МИАС БВР. Для использования МИАС БВР субъектам региональной безопасности требуется:

- завести себе узел в виртуальном пространстве региона;
- подключиться либо через унифицированную точку доступа к МИАС БВР, либо через ведомственную информационную систему управления безопасностью, интегрированную в МИАС БВР;
- зарегистрировать себя и определить свои компетенции для создания онлайн-АРМ, а также настроить необходимые опции своего агента;
- активировать агента. После этого следует ожидать результатов деятельности агента, который автоматически выполняет всю работу по сбору, проблемно-ориентированному поиску и анализу оперативной информации об обстановке на контролируемом объекте, оценке рисков возникновения потенциальных угроз безопасности объектов управления, подбору субъектов для совместного решения задач управления безопасностью, формированию виртуальных организационных структур безопасности (коалиций агентов) и т.д.

В процессе работы МИАС БВР агент взаимодействует с субъектом безопасности – конечным пользователем, предоставляя на рассмотрение результаты своей деятельности или запрашивая уточняющую информацию о сформулированных пользователем задачах в случае поступления экстренной информации в систему, требующей оперативного реагирования, а также в случае изменения структуры или атрибутов МИАС БВР или недостаточности информации о действиях, которые нужно предпринять. При этом пользователь может выбрать, как это будет происходить: интерактивно, в стиле «вопрос–ответ», или в автоматическом режиме. В результате такого взаимодействия формируется система знаний о стратегиях управления безопасностью конкретных процессов и объектов как в стабильных, так и в критических ситуациях.

Реализация в рамках МИАС БВР разработанных распределенной агентной платформы и полимодельных комплексов когнитивных моделей обеспечила технологическую основу для создания и использования саморазвивающихся и самоорганизующихся моделирующих систем на базе веб-сервисов и GRID-технологий, позволяющих оперативно осуществлять поиск и интеграцию проблемно-ориентированных средств моделирования для поддержки решения задач управления безопасностью развития арктических регионов РФ [30]. Это расширяет возможности использования современного Интернет-пространства и способствует развитию новой парадигмы конвергенции когнитивных и веб-технологий «Modeling Web».

Созданные в результате исследований и практических разработок модели, методы и технологии нашли практическое применение в различных задачах информационно-аналитической поддержки управления региональной безопасностью Мурманской области. К основным областям их использования в рас-

смаатриваемом арктическом регионе относятся поддержка принятия решений в сфере управления социально-экономической и промышленно-экологической безопасностью, а также информационное сопровождение функционирования региональных ситуационно-кризисных центров мониторинга и прогнозирования социально-экономического развития.

С учетом информационных, функциональных, прогностических и аналитических возможностей, предоставляемых МИАС БВР, реализованные в ней средства информационно-аналитической поддержки ориентированы на широкий круг потенциальных пользователей, в качестве которых рассматриваются субъекты региональной безопасности, управляемые Советом Безопасности РФ, органы государственной власти (региональные министерства и ведомства), заинтересованные государственные и коммерческие организации в области обеспечения безопасности и устойчивого развития арктических территорий.

Системообразующие программные компоненты МИАС БВР были развернуты на информационно-коммуникационной базе ключевых элементов инфраструктуры безопасности региона – в ситуационно-кризисном центре Правительства Мурманской области, Центре исследований и обеспечения безопасности в Арктике, а также Кольском научном центре РАН при содействии Министерства экономического развития и Комитета по развитию информационных технологий Мурманской области.

Ядро и активные программные компоненты МИАС БВР образуют региональную сетевую виртуальную среду поддержки управления безопасностью развития Мурманской области с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий, обеспечивающую решение следующего спектра задач:

- комплексное представление проблемно-ориентированной информации о социально-экономической и промышленно-экологической обстановке в арктическом регионе;
- предоставление специализированных интерфейсов для различных категорий пользователей и решаемых задач;
- проблемно-ориентированный поиск и анализ информации;
- автоматизация обмена и распределенной обработки данных;
- эффективная работа с информационными ресурсами в распределенной виртуальной среде;
- совместное использование информационных баз по объектам и процессам безопасности региона, а также согласованное информационное взаимодействие в распределенной информационной среде;
- распределенность, интерактивность, мобильность, персонализация когнитивности информационно-аналитической среды;
- регистрация и историзация данных о кризисных ситуациях и динамике развития региона;
- автоматизированный поиск субъектов совместной деятельности для решения задач регионального управления и кризисного реагирования;
- автоматизированное формирование виртуальных организационных структур безопасности под конкретную задачу в зависимости от спецификации ситуации, временных и ресурсных ограничений и выбор эффективных из них;
- мониторинг и оценка показателей безопасности функционирования компонентов региональных социально-экономических систем в реальном масштабе времени;
- синтез допустимых траекторий адаптивного управления безопасностью развития арктического региона и его компонентов с учетом влияния внешних факторов.

Решение указанных задач создало ряд новых возможностей для субъектов регионального управления и заинтересованных структур безопасности:

- унифицированный доступ к единому виртуальному пространству арктического региона для всех субъектов и организационных структур, участвующих в процессах развития и управления безопасностью региональных подсистем и их компонентов;
- возможность системного мониторинга внутренних и внешних угроз региональной безопасности в Арктической зоне РФ;
- возможность анализа и сценарного моделирования развития ситуаций в арктическом регионе;
- возможность анализа и формирования адаптивных траекторий управления рискоустойчивым развитием ключевых подсистем арктического региона;
- возможность получения и оперативной обработки информации по всем аспектам региональной безопасности и социально-экономического развития арктического региона;
- возможность установления сотрудничества с субъектами, обладающими ключевыми компетенциями для совместного решения задач управления развитием арктических регионов;
- возможность учета информационных потребностей различных субъектов регионального управления и организационных структур безопасности в арктическом регионе;
- возможность создания компьютерных тренажеров для чиновников, менеджеров, системных аналитиков, военных, предназначенных для интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению рискоустойчивым региональным развитием в Арктической зоне РФ.

Разработанный прототип МИАС БВР обеспечивает комплексную информационно-аналитическую поддержку, согласованность и повышение эффективности проблемно-ориентированной деятельности субъектов региональной безопасности на всех этапах решения задач управления рискоустойчивым региональным развитием за счет возможности гибкого совместного использования разнородных территориально-распределенных информационных и аналитических ресурсов, обеспечения единого регламента информационного взаимодействия и координации целенаправленного поведения в рамках саморазвивающегося сетцентрического виртуального пространства региона, а также автоматизации рутинных операций по оценке потенциальных угроз региональной безопасности и формированию проблемно-ориентированных организационных структур для упреждающего антикризисного реагирования. Функционал МИАС БВР позволяет проиграть и оценить возможные варианты диффузии ситуации на треке развития региона с учетом его внутренней динамики и влияния внешних факторов, что обеспечивает возможность синтеза допустимых траекторий адаптивного управления региональной безопасностью.

Заключение

В ходе исследований проведен комплекс работ по созданию прототипа сетцентрической мультиагентной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью «Безопасный виртуальный регион» с унифицированной точкой доступа на основе веб-технологий. Разработаны архитектура, управляющее ядро и базовые программные компоненты распределенной информационной среды безопасности региона, обеспечивающие в своей совокупности комплексную информационно-аналитическую поддержку проблемно-ориентированной деятельности субъектов региональной безопасности на всех этапах решения задач управления безопасностью в кризисных ситуациях, а также повышения уровня координации и эффективности их взаимодействия в единой виртуальной среде. Ядро и компоненты распределенной информационной среды образуют иерархическое виртуальное пространство региона как интеграционную площадку для проблемно-ориентированных ситуационно-коалиционных мультиагентных систем поддержки управления рискоустойчивым региональным развитием.

Полученные результаты представляют собой новый когнитивный подход к построению региональных распределенных информационных систем на основе сетцентрических мультиагентных виртуальных пространств, интегрированных в глобальную информационную инфраструктуру. Сфера приложения предложенной в ходе исследований технологии мультиагентной виртуализации процессов управления сложными слабоструктурированными системами, к которым относятся региональные социально-экономические системы, и адаптивного моделирования проблемно-ориентированной деятельности хозяйствующих субъектов на основе когнитивных информационных технологий может быть расширена на решение широкого спектра задач, связанных с управлением региональным развитием, а также организационными и техническими системами различной степени сложности и масштаба.

Вместе с тем хотелось бы отметить некоторые проблемные поля, являющиеся барьерами на пути внедрения предлагаемых разработок в практическую деятельность субъектов и организационных структур региональной безопасности и во многом затрудняющие их использование:

1. несовершенство нормативно-правовой базы;
2. сложность позиционирования виртуальных центров управления безопасностью в кризисных ситуациях в структуре государственного управления как на региональном, так и федеральном уровнях;
3. координация взаимодействия и согласование целей разнородных субъектов безопасности;
4. организационная и административная разнородность субъектов безопасности;
5. интеграция разнородных информационных ресурсов (технологическая, семантическая, организационная разнородность данных).

Литература

1. Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/news/432>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.05.2013).
2. Маслобоев А.В. Методы и когнитивные технологии информационного обеспечения управления рискоустойчивым региональным развитием // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (84). – С. 167–169.
3. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационно-аналитическая поддержка управления безопасностью развития Арктических регионов России: задачи, методы, технологии // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3 (73). – С. 143–145.
4. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scrf.gov.ru/documents/15/98.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.05.2013).

5. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scrf.gov.ru/documents/99.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.05.2013).
6. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Интегрированная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью: этапы и технологии реализации // Труды Института системного анализа РАН: Прикладные проблемы управления макросистемами. – 2012. – Т. 62. – № 3. – С. 61–73.
7. Душкин Д.Н., Фархадов М.П. Сетевые технологии: эволюция, текущее положение и области дальнейших исследований // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 1. – С. 21–29.
8. Иващенко А.В. и др. Мультиагентные технологии для разработки сетевых систем управления // Известия Южного федерального университета. Серия: Технические науки. – 2011. – Т. 116. – № 3. – С. 11–23.
9. Жебрун Н.Н. Использование сервис-ориентированных архитектур при построении информационных систем // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2005. – № 10. – С. 249–254.
10. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
11. Смирнов А.В., Шереметов Л.Б. Модели формирования коалиций кооперативных агентов: состояние и перспективы исследований // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – № 1. – С. 36–48.
12. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Метод минимизации межузловых взаимодействий в одноранговых проблемно-ориентированных распределенных системах // Программные продукты и системы. – 2009. – № 2 (86). – С. 122–126.
13. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. Часть 1. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.
14. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. Часть 2. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 55–75.
15. Маслобоев А.В., Горохов А.В. Проблемно-ориентированная агентная платформа для создания полимодельных комплексов поддержки управления безопасностью региона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 60–65.
16. Sallam A. Integration of Web Services and Agent technologies: Web Services supervision system based on JADE. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 96 p.
17. Liu Ch.-H., Chen J. J.-Y. A Group Agent Architecture Based on FIPA and Ontology: A novel approach to build an agent system in multiple abstraction layers. – LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 64 p.
18. Deloach S.A., Garcia-Ojeda J.C. O-MaSE: a customisable approach to designing and building complex, adaptive multi-agent systems // International Journal of Agent-Oriented Software Engineering. – 2010. – V. 4. – № 3. – P. 244–280.
19. AgentBuilder – an integrated software toolkit that allows software developers to quickly develop intelligent software agents and agent-based applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agentbuilder.com/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.05.2013).
20. Cognitive Agent Architecture (Cougaar) Open Source Project site [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cougaar.org/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 30.05.2013).
21. Youngblood V., Iacovella S. GeoServer Beginner's Guide. – Packt Publishing, 2012. – 350 p.
22. Ехлаков Ю.П., Жуковский О.И., Рыбалов Н.Б. Принципы построения веб-ориентированной ГИС промышленного предприятия // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 146–152.
23. Диковицкий В.В., Ломов П.А., Сепеда-Эррера Р.Р., Шишаев М.Г. Современные методы создания мультипредметных веб-ресурсов на базе визуализации и обработки формализованной семантики // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 3 (6). – С. 72–62.
24. Ломов П.А., Шишаев М.Г., Диковицкий В.В. Преобразование OWL-онтологий для визуализации и использования в качестве основы пользовательского интерфейса // Онтология проектирования. – 2012. – № 3 (5). – С. 49–61.
25. Ломов П.А., Шишаев М.Г. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семантического поиска // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2009. – № 3. – С. 49–59.
26. Маслобоев А.В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 113–125.
27. Путилов В.А., Горохов А.В. Системная динамика регионального развития. – Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.

28. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
29. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. – 2011. – Т. 14. – № 4. – С. 842–853.
30. Олейник А.Г., Федоров А.М. Проблемы и задачи формирования единого информационного пространства Арктической зоны РФ // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – 2011. – № 2 (5). – С. 19–28.

Маслобоев Андрей Владимирович – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, ст. научный сотрудник; Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, зав. кафедрой; кандидат технических наук, доцент; masloboev@iimm.kolasc.net.ru

УДК 004.056

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ УГРОЗ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ОТКРЫТОЙ СРЕДЫ

В.С. Кузнецов, О.В. Лукинова

Представлена референсная модель открытой среды, которая трактует информационную систему как сочетание двух компонент – прикладной и платформенной, функциональность которых структурирована определенным образом. Трехмерность модели позволяет в тех же терминах отображать функциональность таких аспектов, как безопасность информационной системы. В этой связи в работе показана принципиальная возможность структурировать информационные угрозы (атаки) по компонентам модели, что открывает возможности формализации развития атаки в среде информационной системы, моделирования противодействия защитных механизмов и угроз. Предложены алгоритмы решения задач, связанных с идентификацией типа атак при помощи построения векторов параметров, влияющих на безопасность, и генерацией цепочек атак в информационной системе. Результаты, полученные в разделе «Моделирование стратегии атаки», могут быть использованы для решения широкого круга задач, в частности, для оценки возможности реализации атаки и эффективности защитных механизмов.

Ключевые слова: компьютерные атаки, открытая среда, модель атаки, идентификация атак.

Введение

Понятие открытых систем берет начало в решении проблемы совместимости вычислительных, телекоммуникационных и информационных устройств. Решение данной проблемы привело к разработке большого числа международных стандартов и соглашений в сфере применения информационных технологий и разработки информационных систем (ИС). В частности, в [1] описана референсная модель открытой среды, структурирующая определенным образом функциональность ИС. Несмотря на то, что стандарт был разработан достаточно давно, подходы, изложенные в нем, не потеряли своей актуальности и продолжают использоваться [2].

С другой стороны, моделированием угроз, ассоциированных с уязвимостями ресурсов ИС и действиями нарушителя, занимались многие исследователи. В [3] сделан достаточно подробный обзор таблиц Дж. Говарда, графовых структур Б. Шнайера, двухуровневого представления атаки, разработанного в СПИИ РАН, многофакторной теоретико-множественной модели. Однако, с точки зрения авторов, слабостью этих разработок является то, что атака не «ложится» на среду своего распространения – саму информационную систему. Отображение же атак на представлении открытой среды дает возможность осуществить структурную интеграцию известных моделей атак с объектом нападения – ИС. В связи с этим цель работы – показать принципиальную возможность структурирования угроз ИС в соответствии с эталонной моделью открытой среды POSIX OSE/RM (Open System Environment/Reference Model).

Эталонная модель OSE/RM

Согласно определению IEEE POSIX 1003.0 [4], открытой информационной системой (ОИС) называется система, которая реализует открытые спецификации на интерфейсы, сервисы (услуги среды) и поддерживаемые форматы данных, достаточные для того, чтобы дать возможность должным образом разработанному прикладному программному обеспечению быть переносимым в широком диапазоне систем с минимальными изменениями, взаимодействовать с другими приложениями на локальных и удаленных системах, и взаимодействовать с пользователями в стиле, который облегчает переход пользователей от системы к системе.

Среда открытых систем OSE – это функциональная компьютерная среда, которая поддерживает переносимые, масштабируемые и взаимодействующие прикладные программы через стандартные услуги, интерфейсы, форматы и протоколы. Такая среда описывается эталонной моделью среды открытых систем OSE/RM, относящейся к категории референсных моделей, которая позволяет определять стандар-

ты интерфейсов и протоколов взаимодействия между компонентами ОИС. В рамках модели OSE/RM информационная система представляется двумя составляющими (рис. 1): прикладной (Application), предоставляющей автоматизированные бизнес-услуги пользователю, и платформенной (Platform), которая обслуживает потребности приложения в системных сервисах посредством API-функций. Платформенная часть представлена тремя уровнями:

1. компоненты аппаратного слоя (*HW*);
2. компоненты операционного слоя или те компоненты операционных систем, которые составляют базовые функции любой ОС (*OW*);
3. компоненты промежуточного или системно-прикладного слоя (*MW*). Следует пояснить, что к этому уровню относятся те системные услуги ОС, которые требуют дополнительных по отношению к базовым услугам ОС программных реализаций для обслуживания приложений. К таким услугам относятся, например, средства организации удаленного взаимодействия; функции управления базами данных (БД) или базами знаний (БЗ); услуги телекоммуникаций, реализующиеся посредством прикладных протоколов (например, электронной почты, передачи файлов и т.д.).

Кроме того, ИС может общаться с окружением, т.е. набором внешних по отношению к прикладной платформе и приложению информационных систем, взаимодействие с которыми осуществляется через некоторые интерфейсы. Минимальный функциональный набор в таком интерфейсе составляет обеспечение взаимосвязи на базе семиуровневого стека (OSI/RM) в совокупности со средствами организации взаимодействия на основе одного из механизмов вызова удаленных процедур: удаленного вызова метода, брокера объектных запросов и т.д.

Далее функциональность модели разбивается на четыре категории, а именно:

1. функции, обслуживающие интерфейс с пользователем (столбец User);
2. организация всех процессов в системе (столбец System);
3. обеспечение организации, представления, хранения данных, а также доступ к ним (столбец Information);
4. коммуникационные (столбец Communication-C).

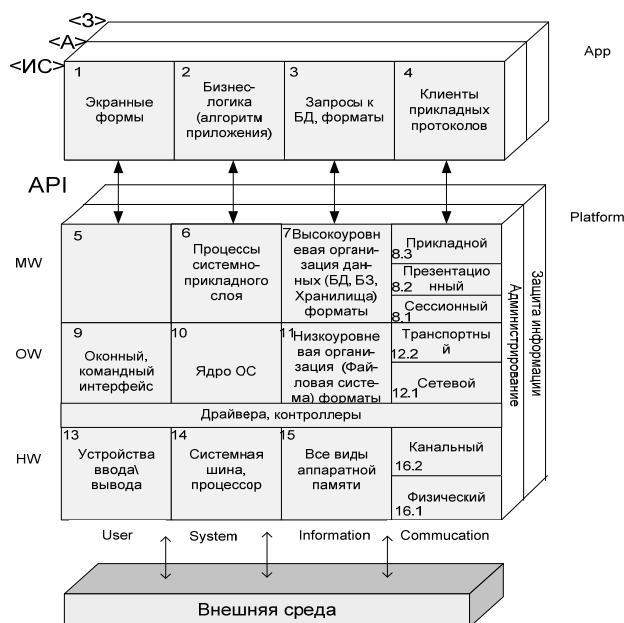


Рис. 1. Концептуальная модель OSE/RM: <ИС> – плоскость функциональности ИС; <А> – плоскость администрирования; <З> – плоскость защиты

Эталонная модель POSIX трехмерна: помимо базовой передней плоскости, в ней выделены плоскости так называемых межкатегорийных сервисов (Cross-CategoryServices) [1], назначение которых – обеспечивать функционал передней плоскости. Таким образом, модель может содержать плоскости сервисов административного управления (ManagementServices), безопасности (SecurityServices), интернационализации (InternationalizationServices) и т.п.

Структуризация информационных атак на основе модели OSE/RM

В рассматриваемой модели авторов в большей степени интересует аспект защиты информации. В [5] рассмотрены два аспекта представления плоскости защиты:

- межкатегорийное, аккумулирующее механизмы (Mx), которые могут быть использованы для защиты реализаций «клеток» передней плоскости модели. Под механизмом понимается некоторый способ реализации той или иной функции защиты, например, механизм контроля целостности, аутентификации, механизм обеспечения доступа и т.п.
- представление приложений защиты в виде базовой функциональности.

В настоящей работе рассмотрен третий аспект представления плоскости защиты – структуризация информационных угроз в виде последовательности (цепочки) «клеток» модели. Угроза – это потенциальная возможность определенным образом нарушить безопасность реализаций «клеток» модели. Попытка реализации угрозы есть атака (разумеется, речь идет об атаках, производимых с помощью вычислительных программно-аппаратных средств в среде данной ИС).

Пусть $\{Str^S\} = \{Str_1^S, Str_2^S, \dots, Str_L^S\}$ – список возможных для данной ИС угроз. Атака Str_1^S означает, что нарушитель должен осуществить некоторые действия в определенных «клетках», направленные на преодоление Mx , установленных в «клетке» (межкатегорийное представление плоскости защиты). Назовем последовательность таких «клеток» цепочкой реализации атаки A_k .

Таким образом, каждая цепочка представима кортежем $A_k(a_1, a_2, \dots, a_H)$, где $a_h, h=1, \dots, H$ – номер «клетки», входящей в цепочку. Ниже представлены примеры структуризации сетевых атак, развитие которых начинается с какой-либо «клетки» столбца С. При этом будем считать, что, если действия нарушителя привели к поражению ресурсов (пользовательских, административных, защитных) «клетки» a_p сетевого стека, то эта «клетка» определяет тип атаки, например, атака физического уровня, атака канального уровня и т.п., т.е. тем самым определяется номер первой «клетки» цепочки $A_k(a_1, a_2, \dots, a_H)$.

Атаки физического уровня. Атаки на физическом уровне характеризуются тем, что используют физические особенности каналов передачи информации, например:

- установка передатчика, заглушающего сигнал от точки Wi-Fi, с целью нарушить работу беспроводной сети;
- съем информации с кабеля посредством анализа электромагнитного излучения;
- нарушение физической целостности кабелей и оборудования;
- массовая рассылка пакетов с разными MAC-адресами, посредством которой возможно выведение из строя маршрутизатора.

Представим развитие последней атаки графически на модели OSE/RM (рис. 2). Здесь $a_p = 16,1$, тогда $A_1(16,1, 16,2, 12,1, 12,2, 8,1, 8,2, 8,3, 6)$.

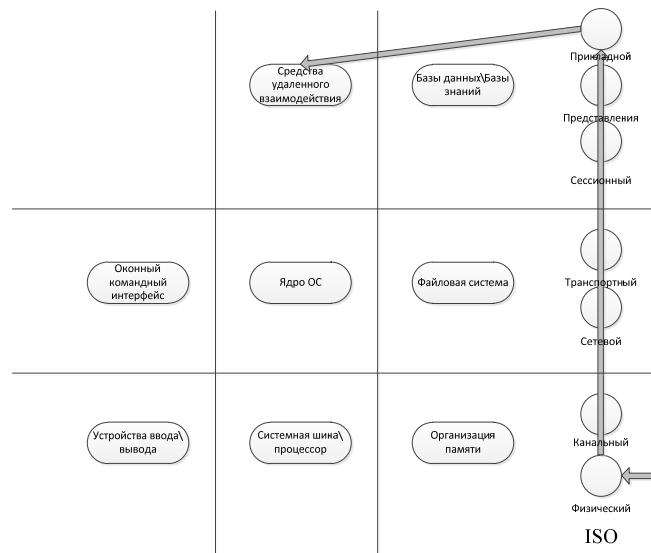


Рис. 2. Представление атаки MAC-flood

Это атака, при которой атакующий рассылает множество Ethernet-фреймов, имеющих разные MAC-адреса. Маршрутизаторы обрабатывают MAC-адреса по отдельности, поэтому им приходится резервировать часть ресурсов для обработки каждого запроса. Когда у маршрутизатора заканчивается память, он либо отключается, либо перестает отвечать на запросы. Для некоторых типов маршрутизаторов возможен полный сброс таблиц маршрутизации.

Атаки канального уровня. Атаки на канальном уровне используют информацию из заголовка канального уровня, например: атаки, имеющие целью подделку MAC-адреса в отправляемых пакетах (MAC-spoofing); взлом протокола шифрования беспроводных сетей Wi-Fi.

Конечной целью обхода протокола шифрования является, как правило, получение привилегий, свойственных легитимным пользователям сети. Наиболее распространенным способом реализации атак

подобного рода являются накопления перехваченных пакетов (при помощи снифера) с последующим анализом используемого протокола шифрования и получением ключей шифрования.

Выразим атаку канального уровня на протокол шифрования беспроводной сети графически на модели OSE/RM (рис. 3). Здесь $a_p = 16,2$, тогда $A_1(16,2, 12,1, 12,2, 8,1, 8,2, 8,3, 7, 11)$.

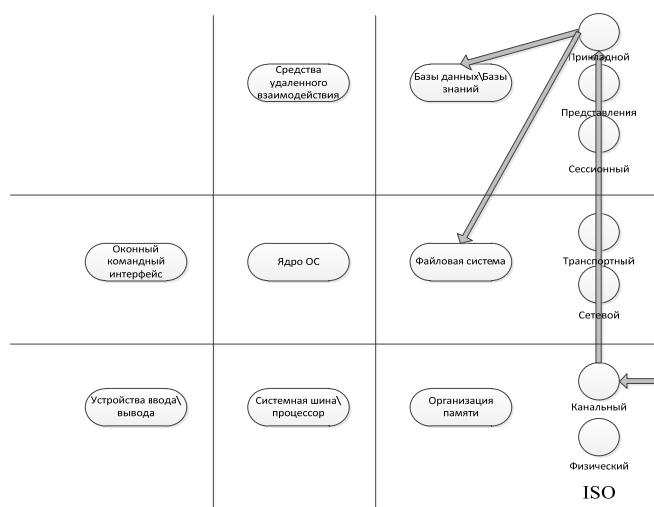


Рис. 3. Атака на шифрование в беспроводной сети

Атаки сетевого уровня. Атаки на сетевом уровне используют протоколы сетевого уровня (IP, ICMP, ARP, протоколы маршрутизации). Примерами таких атак являются подделка IP-адреса в отправляемых пакетах (IPspoofing); атака на протоколы маршрутизации; атака «отказ в обслуживании», ICMP-flood; ARP-spoofing, которая представляет собой разновидность атаки «человек посередине». Рассмотрим последнюю атаку подробнее (рис. 4).

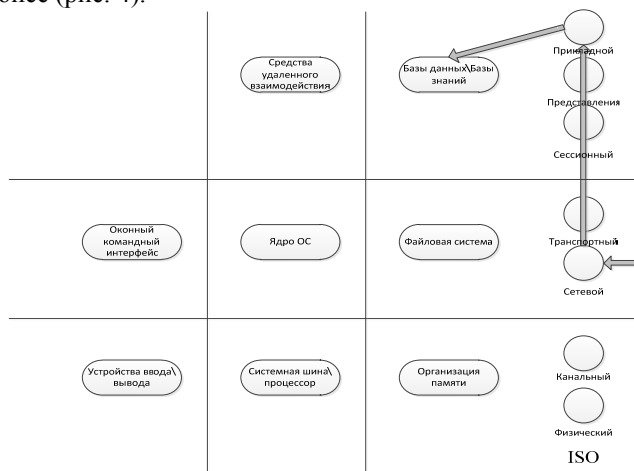


Рис. 4. Представление атаки ARP-spoofing

Для формирования пакета и отправки его в сеть компьютеру необходимо знать IP- и MAC-адреса получателя пакета. IP-адрес, как правило, известен отправителю заранее. Для определения MAC-адреса по известному IP-адресу предназначен протокол ARP. Когда компьютер должен послать пакет по определенному IP-адресу, он изучает свой ARP-кэш на наличие в нем соответствия IP-MAC. Если подобное соответствие найдено, то полученный MAC-адрес вставляется в заголовок исходящего пакета, и тот отправляется в сеть. В противном случае в сеть посылается широковещательный ARP-запрос. Любой компьютер, опознав в запросе свой IP-адрес отвечает отправителю запроса своим MAC-адресом. Атакующий может использовать протокол ARP для того, чтобы перехватить трафик между компьютерами в сети. Эта атака представляется следующей цепочкой: $a_p = 12,1$, тогда $A_1(12,1, 12,2, 8,1, 8,2, 8,3, 7)$.

Моделирование стратегии атаки

Так или иначе, ясно, что атака может быть структурирована на модели OSE/RM. Далее возникает две задачи – идентификация типа атаки и автоматическая генерация цепочки номеров, задействованных в цепочке «клеток».

Идентификация типа атаки. Обозначим $\{P_p^{KS-IC}\} = (k_1^{IC}, \dots, k_n^{IC}, c_1^{IC}, \dots, c_m^{IC}, d_1^{IC}, \dots, d_r^{IC})$ – вектор параметров, определяющих безопасность $\{KS\}$ p -ой «клетки» для плоскости $\langle IC \rangle$, где $(k_1^{IC}, \dots, k_n^{IC}), (c_1^{IC}, \dots, c_m^{IC}), (d_1^{IC}, \dots, d_r^{IC})$ – параметры, определяющие конфиденциальность, целостность, доступность ресурсов p -ой «клетки» соответственно. $\{P_p^{KS-A}\} = (k_1^A, \dots, k_n^A, c_1^A, \dots, c_m^A, d_1^A, \dots, d_r^A)$ – вектор характеристик критериев безопасности $\{KS\}$ p -ой «клетки» для плоскости $\langle A \rangle$. $\{P_p^{KS-Z}\} = (k_1^Z, \dots, k_n^Z, c_1^Z, \dots, c_m^Z, d_1^Z, \dots, d_r^Z)$ – вектор характеристик критериев безопасности $\{KS\}$ p -ой «клетки» для плоскости $\langle Z \rangle$. Тогда $\{P_p^{KS}\} = \{P_p^{KS-IC}\} \cup \{P_p^{KS-A}\} \cup \{P_p^{KS-Z}\}$ – объединенный вектор характеристик, описывающих критерии безопасности p -ой «клетки».

Ненулевая разница между текущими и эталонными значениями вектора $\{P_p^{KS}\}$ будет говорить о факте реализации атаки, тип которой определяется p -ой «клеткой».

Идентификация типа атаки позволит не только выявить объект атаки, но и спрогнозировать конечную цель нарушителя, понять, какое приложение потерпит поражение, так как, атакуя платформу, противник в конечном итоге наносит вред бизнес-процессу, который реализуется данным приложением. Зная же цели противника можно выбрать и адекватные меры реагирования.

Автоматическая генерация цепочки A_k , т.е. номеров, задействованных в цепочке «клеток». Для этого можно задействовать алгоритмы анализирующих грамматик $G = \{T, V, N, P, S, F\}$, где T – множество терминальных символов, т.е. номеров «клеток» 1–16; V – множество переменных грамматик. Начальный символ N определяется номером «клетки», соответствующей каналу проникновения (КА) в систему. Канал может быть визуальным – через экранные формы (номер 1), физическим – через устройства ввода/вывода (номер 13); для сетевых каналов номер «клетки» равен a_p , т.е. вывод цепочки может начаться с $N = (a_h = 1 / a_h = a_p / a_h = 13)$.

Далее на основании опроса экспертов необходимо сформировать следующие матрицы:

- матрицы переходов $F = \|f_{ij}\|, i, j = 1 \dots 16$, где $f_{ij} = 0$, если переход из i -ой «клетки» в j -ую невозможен; $f_{ij} = 1$, если такой переход возможен;
- матрицу стратегий $S = \|s_{il}\|, i = 1 \dots 16$, которая содержит экспертные оценки возможности использования i -й «клетки» при реализации l -й стратегии, где $s_{il} = 0$, если «клетка» в стратегии не может быть использована; s_{il} равна некоторому числу в противном случае.

Правила вывода P определяют способы формирования цепочек A_k из «клеток» с $s_{il} \neq 0$ в соответствии с матрицами F .

В свою очередь, каждую атаку Str_i^s нарушитель может осуществить несколькими способами, т.е. может использовать разные цепочки реализации $\forall Str_i^s \rightarrow (A_1, A_2, \dots, A_k)$.

В результате будем иметь соответствия показанные на рис. 5.

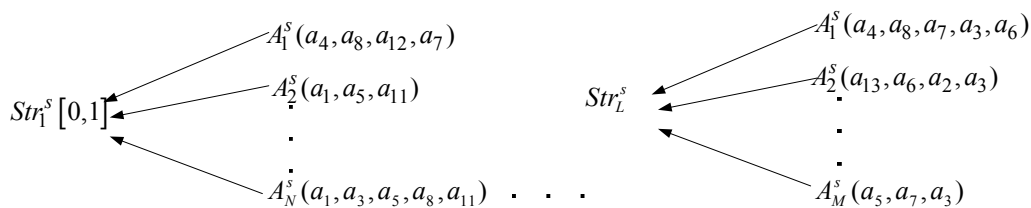


Рис. 5. Примеры соответствий цепочек A_k и стратегий Str_i^s

Определение. Совокупность $\{Str^s\} = \{Str_1^s, Str_2^s, \dots, Str_L^s\}$, в которой $\forall Str_i^s \rightarrow (A_1, A_2, \dots, A_k)$, назовем моделью атак (МА).

Такая модель атак может быть сгенерирована автоматизированной системой управления безопасностью ИС и позволит решать в оперативном порядке следующие задачи.

- осуществлять контроль «клеток», задействованных во всей цепочке A_k , если в одной из «клеток» зафиксировано действие нарушителя.
- оценить возможность реализации атаки Str_i^s .
- оценить интервал времени до того момента, когда вследствие реализации той или иной стратегии нападения пользовательское приложение «рухнет».
- на стадии проектирования защиты ИС оценить возможность того, насколько защитные механизмы, задействованные в «клетках», смогут противостоять A_k -й цепочке атаки, т.е. оценить возможность противодействия механизмов защиты цепочке A_k -й.

Заключение

Описанные методы и алгоритмы представления атак в плоскости модели OSE/RM открывают возможность моделирования взаимодействия информационных атак и механизмов защиты, что позволит выделить «узкие» места в избранной политике безопасности информационной системы, «проигрывать» различные сценарии при проектировании систем защиты, оценивать степень противодействия защитных механизмов и элемента атаки, сопоставленных «клетке» информационной системы.

Авторы ставят своей целью в последующих публикациях отобразить в рамках модели OSE/RM классические механизмы защиты, проработка по данным направлениям ведется в [2, 5].

Литература

1. ISO/IEC TR 14252-96. Information technology. Guide to the POSIX Open System Environment (OSE). – 1996. – 190 p.
2. Бойченко А.В., Лукинова О.В. Применение модели POSIX OSE/RM при построении подсистем информационной безопасности // Труды международной конференции «Интеллектуальные системы» (AIS10). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – Т. 2. – С. 473–476.
3. Сердюк В.А. Организация и технологии защиты информации: обнаружение и предотвращение информационных атак в автоматизированных системах предприятий: Учебное пособие. – М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2011. – 572 с.
4. IEEE Std 1003.0-1005, IEEE Guide to the POSIX Open System Environment (OSE). – N-Y.: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995. – 194 p.
5. Лукинова О.В. Методология проектирования систем защиты, построенных на основе референсной модели POSIX OSE/RM // Системы высокой доступности. – 2012. – № 3. – С. 38–45.

Кузнецов Владимир Сергеевич – Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, аспирант, kuznecov.vladimir.00@mail.ru
Лукинова Ольга Васильевна – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, lobars@mail.ru

УДК 004.4

КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ДОСТУПА ДЕТЕЙ К ИНФОРМАЦИИ В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Р.Ф. Жаринов, Ю.В. Трифонова

Законодательство Российской Федерации устанавливает виды информации, запрещенные и ограниченные для распространения среди детей в зависимости от их возрастной категории. В работе авторами предложена концепция системы, позволяющая обеспечить безопасное использование информации при организации многопользовательского доступа для различных возрастных категорий пользователей с использованием существующей инфраструктуры идентификации личности человека. В частности, внимание уделено основным модулям – фильтрации информации и авторизации пользователей в системе. Модуль фильтрации предоставляет возможность детектирования и ограничения доступа к запрещенной информации на основе интеллектуального поиска корня слова, а также белых или черных списков. Политики безопасности для текстовой фильтрации используют базу данных DLP-системы. При этом кардинальное изменение схемы работы системы связано с перенаправлением режима работы фильтрации контента. Авторизация происходит с использованием существующей инфраструктуры бесконтактных смарт-карт, поддерживающих технологию радиочастотной идентификации (примером являются смарт-карты, используемые для проезда на общественном транспорте). Целью разработки системы являются такие параметры, как минимизация затрат при ее внедрении, а также отсутствие необходимости квалифицированного персонала при ее использовании.

Ключевые слова: DLP-система, радиочастотная идентификация (RFID), информационная безопасность, фильтрация информации.

Введение

В сентябре 2012 года в России вступил в силу Федеральный закон от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» [1], который определяет не только виды информации, запрещенные к распространению среди детей, но и виды информации, ограниченные для распространения среди детей в зависимости от их возрастной категории. Таким образом, появляется задача создания системы, которая в зависимости от заданной возрастной категории пользователя будет производить фильтрацию загружаемого контента. Предлагается создать систему фильтрации обрабатываемого контента с использованием предварительно настроенной базы данных Data Leak Prevention (DLP)-системы. Такая система позволит организовать безопасную работу с информацией для несовершеннолетних, что особенно актуально для общеобразовательных учреждений, где обучающиеся во время работы в сети Интернет отчасти предоставлены самим себе.

Виды информации, запрещенные или ограниченные для распространения среди детей

Согласно законодательству Российской Федерации (РФ), к информации, запрещенной для распространения среди детей, относится [1]:

1. информация, побуждающая детей к совершению действий, представляющих угрозу их жизни и здоровью, в том числе к самоубийству;
2. информация, вызывающая желание употребить наркотики, психотропные и одурманивающие вещества, табачные изделия, алкогольную и спиртосодержащую продукцию, пиво;
3. информация, вызывающая желание принять участие в азартных играх, заняться проституцией, бродяжничеством или попрошайничеством;
4. информация, обосновывающая или оправдывающая допустимость насилия, жестокости по отношению к людям и животным;
5. информация, отрицающая семейные ценности и формирующая неуважение к родителям и другим членам семьи;
6. информация, оправдывающая противоправное поведение;
7. информация, содержащая нецензурную брань;
8. информация, содержащая информацию порнографического характера.

Кроме этого, была выделена информация, распространение которой среди детей определенных возрастных категорий ограничено. К ней относятся:

- информация, представляемая в виде изображения или описания жестокости, физического и психического насилия, преступления или иного антиобщественного действия;
- информация, вызывающая у детей страх, ужас или панику, в том числе представляемая в унижающей человеческое достоинство форме (ненасильственная смерть, заболевание, самоубийство, несчастный случай, авария, катастрофа или их последствия);

- информация, изображающая или описывающая половые отношения между мужчиной и женщиной;
- информация, содержащая бранные слова и выражения, не относящиеся к нецензурной брани.

Таким образом, информационную продукцию (ИП) разделяют на пять групп в зависимости от содержания в ней информации, распространение которой среди детей определенных возрастных категорий ограничено, для каждой группы определен соответствующий знак ИП:

1. «0+» – ИП для детей, не достигших возраста шести лет;
2. «6+» – ИП для детей, достигших возраста шести лет;
3. «12+» – ИП для детей, достигших возраста двенадцати лет;
4. «16+» – ИП для детей, достигших возраста шестнадцати лет;
5. «18+» – ИП, запрещенная для детей.

Для каждой возрастной группы в системе предлагается разработать свою политику безопасности, которая будет учитывать информацию, ограниченную для распространения среди детей конкретной возрастной категории.

Фильтрация с целью детектирования и ограничения доступа к запрещенной информации

Для организации безопасной работы с информацией необходимо производить фильтрацию данных различного вида, в том числе текстовой информации, изображений и аудио-видео информации.

Фильтрация текстовой информации. Для данного вида фильтрации, а также использования комплексного подхода ограничения доступа к информации предлагается использование DLP-системы. DLP-система – это технология методов и средств защиты от утечки конфиденциальной информации, которая позволяет обнаружить случайное или умышленное несанкционированное использование конфиденциальной информации пользователей Интранет-сети. В DLP-системе предусмотрены возможности автоматического и ручного анализа фактов утечки конфиденциальных данных в информационных потоках. Так как система может анализировать данные, выходящие за пределы локальной сети, на наличие конфиденциальной информации, то предлагается перенастроить ее режим прослушивания трафика таким образом, чтобы можно было бы использовать ее для анализа входящей информации, на наличие запрещенного контента. DLP-системы позволяют анализировать данные при их передаче по сетям, обработки на личных компьютерах, хранении в локальной сети (общих ресурсах хранения файлов, базах данных и других репозиториях данных). В настоящее время самыми распространенными DLP-системами на российском рынке программного обеспечения для корпоративных клиентов являются InfoWatch Traffic Monitor, SecurIT Zgate, Symantec DLP, Websense DSS. Сравнительный анализ указанных DLP-систем приведен в табл. 1.

В связи с тем, что в общеобразовательных учреждениях не предусмотрено финансирование для закупки специализированного дорогостоящего программного обеспечения, в таблице, кроме широко используемых платных DLP-систем, представлены открытые DLP-системы – OpenDLP и MyDLP. Под открытыми DLP-системами подразумеваются системы, которые распространяются как свободный программный продукт с открытым кодом. Таким образом, пользователю предоставлены неограниченные права на использование, модификацию и распространение программного продукта на бесплатной основе.

Исходя из сравнительных характеристик, представленных в табл. 1, для реализации Концепции была выбрана открытая система контроля утечек данных MyDLP. Основными функциями выбранной системы являются: анализ протоколов http и защищенной версии https, документов Microsoft Office, архивов (rar, 7zip, zip), вычисление цифровых отпечатков файлов при помощи криптографической хеш-функции md5, возможность интеграции с веб-прокси (например, Squid).

Функционально MyDLP-система состоит из четырех компонентов [2]:

1. MyDLP Network – сетевой сервер, который перехватывает TCP-пакеты для дальнейшего анализа. Сервер позволяет выдерживать высокие нагрузки при работе в «облаке»;
2. MyDLP Endpoint – агент, устанавливаемый на персональные компьютеры пользователей (поддерживаются операционные системы семейства Microsoft Windows), который позволяет контролировать большинство критических операций – копирование файлов, печать, создание снимка экрана, получение прав администратора и т.д.;
3. MyDLP Security Monitor – подсистема аудита передаваемых по интрасети данных. Также является централизованным компонентом для хранения и обработки отчетов безопасности;
4. MyDLP Web UI – инструмент управления настройками компонентов и актуализации политик безопасности. В выбранной DLP-системе необходимо доработать модуль анализа текстовой информации для возможности использования алгоритмов морфологического разбора слова, введения частоты встречаемости «запрещенных» слов.

К сожалению, использование международного опыта в направлении фильтрации текстовой информации неприменимо для русского языка ввиду его сложности и особенностей образования словоформ.

Наиболее эффективный алгоритм поиска «запрещенных» или потенциально опасных слов для русского языка – морфологический разбор слова. Под морфологическим разбором понимается интеллекту-

альный анализ текста, т.е. поиск ключевых слов во входном потоке информации. В русском языке существует большое количество слов, для которых нет однозначного разбора. На данный момент имеется несколько способов выделения основной части слова.

Параметр	Фирма					
	Info Watch	SecurIT	Symantec	Websense	MyDLP	OpenDLP
Название системы	Traffic Monitor	Zgate	Data Loss-Prevention	Data Security Solutions	Data Loss Prevention	Data Loss Prevention
Модульность системы	Нет	Да	Нет		Да	Нет
Места установки	Сервер, клиент	Сервер, клиент	Сервер, клиент	Сервер, клиент	Сервер (linux), Клиент (windwos)	Сервер
Роли	Несколько	Любое количество	Любое количество	Любое количество	Несколько	Нет
Текстовый анализ	Словарь, лингвистический анализ, транслит	Словарь, лингвистический анализ, транслит	Словарь, лингвистический анализ	Словарь, лингвистический анализ	Полное совпадение, регулярные выражения	Полное совпадение, регулярные выражения
Возможность написания дополнительных модулей	Нет, только создание расширенных политик безопасности	Нет, только создание политик безопасности	Нет, только создание политик безопасности	Нет, только создание политик безопасности	Есть, Erlang, Python, php	Есть, perl
Цена	2 500 000 р.	После анализа заказчика	После анализа заказчика	После анализа заказчика	Open Source	Open Source

Таблица 1. Сравнение популярных и открытых DLP-систем

- Составление собственного морфологического словаря. Данный способ является трудоемким и не гарантирует 100% результат, что объясняется большим количеством словоформ русского языка.
- Использование алгоритма стемматизации – процесса поиска основы слова для входного значения [3]. Не используются словари, и выделение основы-корня осуществляется при помощи удаления суффиксов и окончания, применяя основные морфологические правила русского языка, вследствие чего алгоритм работает быстро, но с некоторой погрешностью.
- Определение исходного слова по аффиксу (окончанию и суффиксу слова). Данный метод позволяет преобразовывать слова к начальным словоформам. Пример: «продавать информацию» преобразуется алгоритмом в «продать информация». Также присутствуют дополнения, или так называемые слова-исключения, которые не изменяют свою форму (предлоги, «не», наречия, «столь» и т.д.). Для более точного преобразования слова необходимо добавить максимально возможное количество исключений.

На начальном этапе разработки системы предлагается использовать алгоритм стемматизации, так как он позволяет сформировать структуру слова, тем самым создавая более гибкие политики безопасности.

После морфологического разбора входных данных необходимо провести анализ частоты встречаемости «запрещенных» слов. Для каждого множества слов из политики безопасности (для каждой возрастной категории детей) офицером безопасности (или разработчиком системы) задается своя допустимая частота встречаемости в тексте. Информация порнографического характера запрещена для распространения среди несовершеннолетних, поэтому словам этой категории будут соответствовать минимальная допустимость встречаемости. Таким образом, если входное слово, находящееся во множестве значений политики безопасности (например, выявления слов порнографического характера), встретиться хотя бы раз, то доступ к содержанию запрашиваемого ресурса будет запрещен, тогда как слову из группы «табакокурения» будет соответствовать большая допустимая частота встречаемости (например, слово «курение» может встречаться в тексте не более 3 раз). В случаях, когда необходимо обойти политику безопасности, предусмотрен функционал временного отключения как отдельных правил, так и всей политики безопасности.

- Фильтрация изображений.** Для детектирования могут быть использованы следующие подходы:
- «вырезание баннеров» по ссылке, по размеру, по набору регулярных выражений (по «маске»);
 - использование алгоритмов определения обнаженных тел;
 - прочее.

Для блокировки и удаления рекламы, а также порнографических роликов и изображений используются регулярные выражения со сторонних сайтов. Интернет-сообщество в процессе своей работы создает библиотеку «масок» для блокировки рекламы (изображений), содержащей запрещенную, нежелательную и (или) навязчивую информацию [4].

Для фильтрации изображений могут использоваться различные сервисы и алгоритмы. Их сравнительный анализ приведен в табл. 2.

Параметр	Сервис			
	piFilter	LogiPik	Finding Naked People	Nudity Detection
Встраивание	Обработка переданных изображений	RNP5 библиотека	Алгоритм [5]	Алгоритм [6]
Точность	91,5%	90%	43%	94%
Стоимость	134\$ за 60000 запросов	Индивидуальный подход	Open Source	Open Source

Таблица 2. Сравнительный анализ сервисов и алгоритмов, производящих анализ изображений на наличие информации порнографического характера

На первом этапе предлагается синтезировать открытые алгоритмы анализа изображений на наличие в них запрещенной информации для повышения надежности работы системы.

Фильтрация аудио-видео контента. Это самый сложный вид информации с точки зрения фильтрации. Открытых алгоритмов поиска запрещенной информации в аудио-видео контенте нет. По этой причине на первом этапе создания системы предлагается сделать фильтрацию аудио-видео контента путем введения белых списков. Так, например, прослушивание аудиодорожек может быть разрешено с ресурса music.yandex.ru [7], видео – с youtube.com [8], а также с отдельных подразделов выбранных ресурсов (т.е. прослушивание конкретного альбома или просмотр конкретного канала).

Знак информационной продукции

Федеральный закон «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» [1] вводит понятие знака ИП. По сути, это метка на информации, которая говорит о возрастной категории детей, начиная с которой эта информация возможна для распространения среди детей. Однако Федеральный закон позволяет владельцам Интернет-ресурсов самостоятельно принимать решение о необходимости маркировки своего контента. Кроме того, на сегодняшний день еще не разработаны нормативные документы, регламентирующие маркировку электронной информации [9]. В разрабатываемой системе предполагается предусмотреть возможность фильтрации информации в зависимости от указанного знака ИП. Но такая фильтрация не будет отменять работу всех ранее описанных фильтров, поскольку возможна подмена знака ИП.

Авторизация

В качестве уникального идентификатора личности, а также для увеличения удобства эксплуатации разрабатываемой системы авторизацию предлагается реализовать с использованием RFID-технологий на основе бесконтактной смарт-карты (БСК), которые применяются для проезда на общественном транспорте. В метрополитене используются RFID-карты MIFARE Classic одной из двух модификаций – 1K или 4K. Карта MIFARE Classic поделена на секторы (16 или 40 секторов в зависимости от модификации), доступ к которым защищен двумя 48-битными ключами A и B. На данных картах помимо служебной информации, хранится информация о держателе карты, включая такие данные как: фамилия, имя, отчество, пол и дата рождения. Эти данные находятся в секторах 13–14, доступ к которым осуществляется по определенному в стандарте «MIFARE Application Directory (MAD)» [10] ключу a0a1a2a3a4a5 hex или 0000000000 hex. Остальные сектора карты являются закрытыми, и получить доступ к ним можно лишь зная соответствующие ключи, или при помощи утилит, позволяющих восстановить ключи доступа к секторам.

Для получения информации от радиочастотной метки необходимо установить RFID-считыватели на каждое рабочее место или использовать современные ноутбуки со встроенными NFC-чипами, позволяющие эмулировать работу считывателя RFID-меток семейства MIFARE. Стоимость внешних RFID-считывателей, подходящих для решения рассмотренной задачи, составляет от 900 рублей за одну единицу товара (при массовой закупке) [11]. Радиочастотная смарт-карта должна находиться в поле видимости

считывателя на протяжении всего рабочего времени с системой. Если же RFID-карта не предъявлена, то по умолчанию действует политика безопасности для возрастной группы 0+.

Для исключения возможности использования чужой RFID-карты предложено использовать метод фильтрации «черный список». В данный список будут заноситься уникальные идентификаторы личных радиочастотных БСК, которые были утеряны или переданы другим лицам.

Заключение

Реализация представленной концепции позволит обеспечить безопасный доступ пользователей различных возрастных категорий к информации, которая передается по таким информационным каналам, как всемирная сеть Интернет, внутренняя сеть Интранет, и обрабатывается на рабочем месте пользователей. Возможность использования открытых алгоритмов позволит сократить время разработки системы, а также легко модифицировать или компоновать ее под конкретные требования. Основная функциональная часть системы (обнаружение потенциально опасной информации, получаемой из сети) является кроссплатформенной.

Выбранный способ авторизации на основе радиочастотной идентификации является примером использования существующей инфраструктуры идентификации пользователей.

На начальном этапе планируется реализовать модули общего назначения – модуль анализа текстовой информации, модуль детектирования изображений обнаженных тел и порнографического содержания, модуль авторизации с использованием смарт-карты RFID, а также фильтрацию аудио-видеоконтента на основе разрешительных и запретительных списков. Впоследствии планируется перевести базу данных, содержащую актуальные политики безопасности, в облачное хранение данных, тем самым актуализируя базы при помощи распределенных каналов передачи данных.

Литература

1. Федеральный закон от 29.12.2010 № 436-ФЗ «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию».
2. Data Sheet MyDLP Data Leak Prevention [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mydlp.com/wp-content/uploads/MyDLP-datasheet.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.09.2012).
3. Russian stemming algorithm [Электронный ресурс]. – <http://snowball.tartarus.org/algorithms/russian/stemmer.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.09.2012).
4. Список правил блокирования и скрытия рекламы для русско- и украинско-язычных сайтов RU AdList [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://code.google.com/p/tuadlist>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.09.2012).
5. Finding Naked People [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cs.hmc.edu/~fleck/naked.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.09.2012).
6. Rigan Ap-apid. An Algorithm for Nudity Detection [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://onebit.us/x/i/814381733331796005.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 25.09.2012).
7. Сервис Яндекс. музыка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: music.yandex.ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.10.2012).
8. Сервис видеохостинга youtube [Электронный ресурс]. – Режим доступа: youtube.com, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.10.2012).
9. Трифонова Ю.В. Защита детей от нежелательного Интернет-контента // Формирование современного информационного общества – проблемы, перспективы, инновационные подходы: Материалы международного форума. – СПб: ГУАП, 2012 – С. 186–190.
10. MIFARE Application Directory (MAD) AN10787 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10787.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 15.10.2012).
11. Интернет-магазин smart-card.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smart-card.ru/mifare-reader/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 19.10.2012).

Жаринов Роман Феликсович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант, roman@vu.spb.ru
Трифопова Юлия Викторовна – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ассистент, julia@vu.spb.ru

УДК 681.3

ОПТИМАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ АГРЕГИРОВАННЫХ РАДИАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

В.А. Богатырев, А.В. Осипов

Поставлена и решена задача оптимального резервирования агрегированного радиального канала с учетом надежности и среднего времени пребывания кадров при ограничении средств на реализацию системы и ограничениях на минимальное количество агрегированных линий в каналах, определяемых исходя из условий стационарности обмена.

Ключевые слова: кратность резервирования, оптимизация, агрегированный канал, надежность.

Проектирование вычислительных систем требует решения оптимизационной задачи обеспечения высокой надежности, отказоустойчивости и производительности систем при минимизации средств на их реализацию.

Рассмотрим вычислительную систему, в которой корневой узел связан с N радиально соединенными с ним узлами. Условие работоспособности такой системы заключается в необходимости взаимосвязи корневого узла со всеми узлами, при этом связь с i -м узлом ($i = 1, 2, \dots, N$) осуществляется через агрегированный (резервированный) канал, включающий n_i линий, причем необходима исправность хотя бы g_i из n_i линий [1, 2]. Значение g_i определяется из условий стационарности (отсутствия перегрузок) $(v_i \lambda_i / g_i) < 1$, где λ_i – интенсивность потока запросов на передачу кадров между i -м и корневым узлами; v_i – среднее время их передачи.

При оптимизации системы ищется кратность резервирования линий в агрегированных каналах связи корневого узла с N подключенными к нему узлами, при условии, что затраты на реализацию системы не превышают выделенных на ее построение средств C [3, 4]. Заметим, что рассматриваемая задача оптимизации является целочисленной. Оптимизация проводится по критерию максимума надежности системы P , минимума среднего времени T пребывания запросов в ней или по мультипликативному критерию, определяемым соответственно как

$$P = \prod_{j=1}^N \left[\sum_{i=g_j}^{n_j} \left(C_n^k P_j^i (1-P_j)^{n_j-i} \right) \right], T = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\lambda} \left(\frac{v_i}{1 - (v_i \lambda_i / n_i)} \right), M = P/T,$$

где $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$, $\left(\sum_{i=1}^N c_i n_i \right) \leq C$, $v_i = l_i / BR_i$; l_i – средний объем кадров, пересылаемых i -му узлу через агрегированный канал с пропускной способностью линии BR_j и стоимостью c_j ; P_j – вероятность работоспособности линии связи с j -м узлом. При оптимизации по среднему времени пребывания запросов для всех N агрегированных каналов должно соблюдаться условие $(v_i \lambda_i / n_i) < 1$, а при оптимизации по надежности – условие $(v_i \lambda_i / g_i) < 1$.

Зависимость оптимального числа каналов (кратность резервирования) от величины средств C , выделенных на построение системы, представлена на рисунке, а, при максимизации надежности и на рисунке, б, – при минимизации среднего времени пребывания запросов. Расчет проведен при $N = 3$ шт., $c_1 = 20$ у.е., $c_2 = 25$ у.е., $c_3 = 23$ у.е., $P_1 = 0,91$, $P_2 = 0,95$, $P_3 = 0,97$, $g_1 = 1$ шт., $g_2 = 2$ шт., $g_3 = 1$ шт., $BR_1 = 50 \cdot 10^3$ бит/с, $BR_2 = 60 \cdot 10^3$ бит/с, $BR_3 = 54 \cdot 10^3$ бит/с, $l_1 = 2048$ бит, $l_2 = 1024$ бит, $l_3 = 1024$ бит.

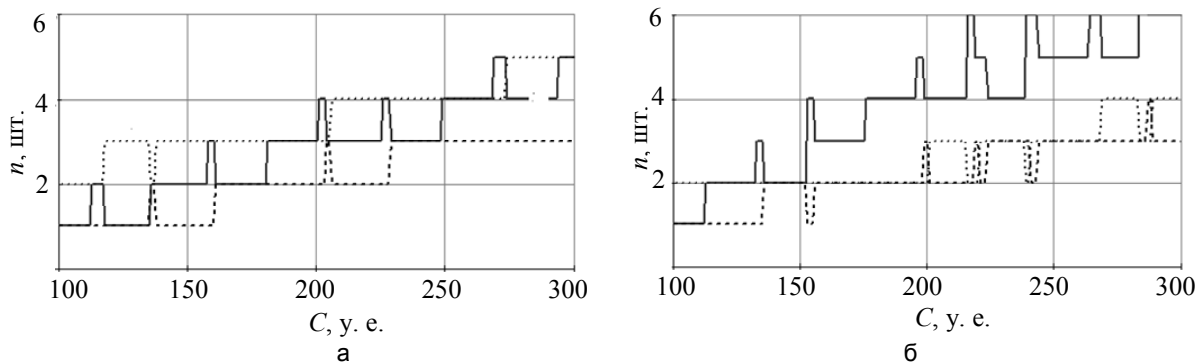


Рисунок. Оптимизация кратности резервирования по надежности (а); оптимизация числа каналов по среднему времени передаче кадров в канале (б)

Проведенные исследования показывают существенность влияния кратности резервирования различных радиальных агрегированных каналов на эффективность системы, причем оптимальное распределение кратности резервирования каналов скачкообразно меняется в зависимости от средств C , выделяемых на построение системы.

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники НИУ ИТМО в рамках НИР «Разработка методов и средств системотехнического проектирования информационных и управляющих вычислительных систем распределенной архитектуры».

1. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // Информационные технологии. – 1999. – № 9. – С. 44–48.
2. Богатырев В.А., Евлахова А.В., Котельникова Е.Ю., Богатырев С.В., Осипов А.В. Организация межмашинного обмена при резервировании магистралей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 2 (72). – С. 171.
3. Осипов А.В., Богатырев В.А. Варианты объединения разнотипных каналов вычислительной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 2 (78). – С. 145.
4. Осипов А.В., Богатырев В.А. Организация обмена через резервированные магистрали локальных сетей управления машинами и агрегатами // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 4 (22). – С. 48–52.

Богатыре Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Осипов Андрей Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, osipov-andrey@mail.ru

УДК 681.324

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В.А. Богатырев, А.В. Богатырев

Предложена оценка надежности системы при требовании выполнения критических запросов с задержкой, меньшей предельно допустимого значения, с учетом готовности системы при поступлении запроса и ее безотказности во время ожидания и обслуживания запроса.

Ключевые слова: надежность, показатель надежности, реальное время, вычислительная система.

Существующая система общетехнических показателей надежности не позволяет учесть особенностей вычислительных систем, работающих в реальном времени. Для таких систем при оценке надежности при требовании своевременного выполнения критических запросов необходимо определить вероятность выполнения запроса с задержкой, меньшей предельно допустимой величины t_0 , с учетом готовности (работоспособности) системы при поступлении запроса (коэффициент готовности) и ее безотказности во время ожидания и обслуживания запроса. Для систем реального времени как дополнительный показатель может оцениваться вероятность работоспособных состояний системы, для которых среднее время пребывания запросов меньше допустимых ограничений [1–3]. Будем считать, что восстановление системы во время выполнения критической задачи невозможно.

Вероятность своевременного (с задержкой меньше t_0) выполнения критического запроса вычислим как $P = Kp(T)p(t_0)$, где $K = \mu/(\lambda + \mu)$ – коэффициент готовности системы; $p(T) = \exp(-\lambda T)$ – вероятность безотказной работы за время пребывания запроса; $p(t_0)$ – вероятность его задержки, меньшей, чем t_0 . При этом λ и μ – интенсивности отказов и восстановлений системы соответственно.

Представляя исследуемый объект в виде системы массового обслуживания типа М/М/1, найдем среднее время пребывания запросов как $T = v/(1-\Lambda v)$ и вероятность задержки (времени пребывания), меньшей, чем t_0 , как $1 - \Lambda v \exp(-t_0(v^{-1} - \Lambda))$, здесь Λ и v – интенсивность запросов и среднее время их выполнения соответственно. Вероятность решения критической задачи, требующей выполнения всех поступающих в интервале времени t запросов, при условии непревышения их задержками времени t_0 , определим как $P = K \exp(-\lambda t) [1 - \Lambda v \exp(-t_0(v^{-1} - \Lambda))]^{\Lambda t}$, где $\exp(-\lambda t)$ – вероятность безотказной работы системы за время t решения функциональной задачи, а Λt – среднее число запросов, выполняемых за время t , при их поступлении с интенсивностью Λ .

Зависимость вероятности своевременного выполнения критических запросов от интенсивности их поступления Λ представлена кривыми 1–7 для $t_0 = 1, 5, 2, 4, 6, 10, 20, 50$ с соответственно на рис. 1, а. Зависимость вероятности своевременного выполнения критических запросов от t_0 представлена на рис. 1, б, кривыми 1–5 для $\Lambda = 0,95, 0,9, 0,8, 0,5, 0,2$ 1/с соответственно. Расчеты произведены при $v = 1$ с, $\lambda = 10^{-4}$ ч⁻¹, $\mu = 1$ ч⁻¹. Зависимость вероятности решения критической задачи, предполагающей во время ее решения $t = 5, 8, 10, 50, 100, 200, 500$ с выполнения всех поступающих с интенсивностью Λ запросов, представлена кривыми 1–7 на рис. 2, а, при $t_0 \leq 2$ с, а на рис. 2, б, – при $t_0 \leq 10$ с.

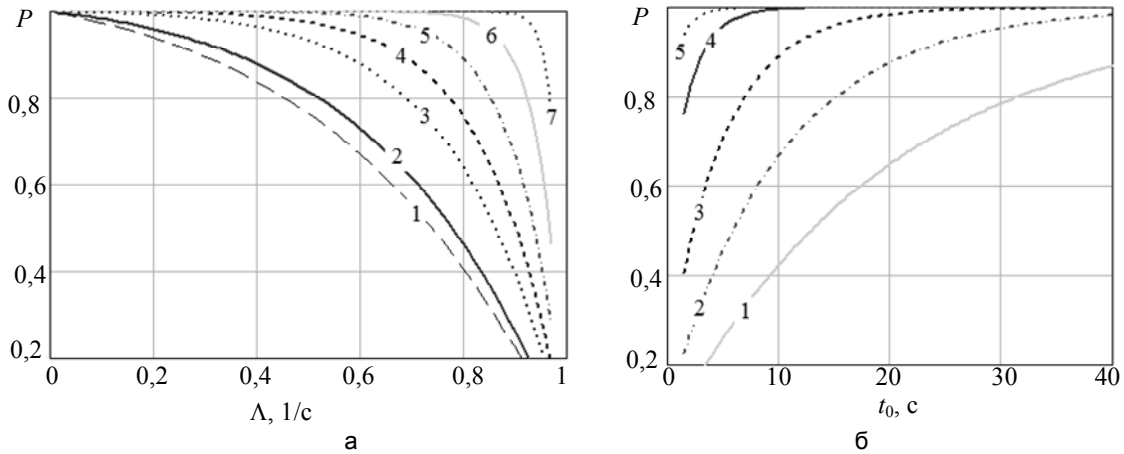


Рис. 1. Вероятности своевременного выполнения критического запроса: от интенсивности их поступления Λ – кривые 1–7 для $t_0 = 1,5, 2, 4, 6, 10, 20, 50$ с (а); от t_0 – кривые 1–5 для $\Lambda = 0,95, 0,9, 0,8, 0,5, 0,2$ 1/c

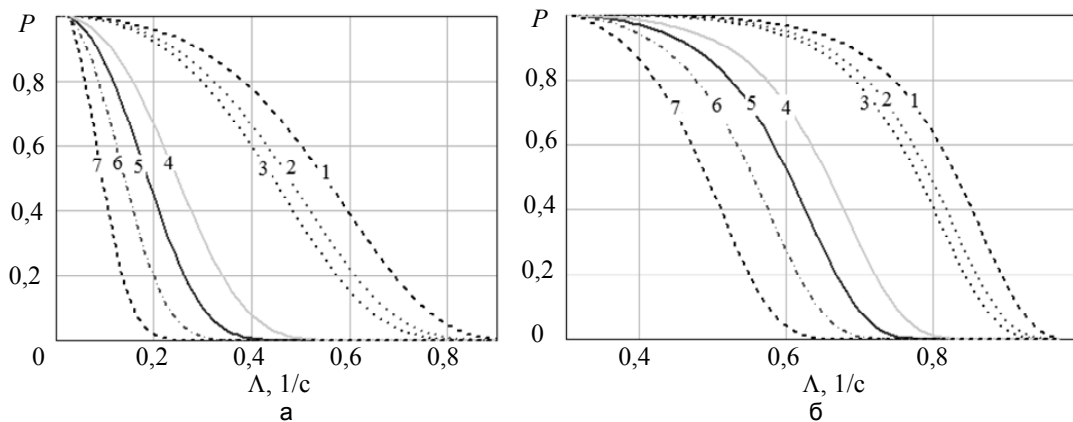


Рис. 2. Вероятность решения критической задачи (кривые 1–7) от интенсивности поступления запросов Λ для времени решения задачи $t = 5, 8, 10, 50, 100, 200, 500$ с: при $t_0 \leq 2$ с (а) и при $t_0 \leq 10$ с (б)

Таким образом, для систем реального времени предложена комплексная оценка надежности, учитывающая готовность вычислительной системы, ее безотказность и вероятность задержек запросов меньших предельно допустимых.

1. Богатырев В.А. Exchange of Duplicated Computing Complexes in Fault tolerant Systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2011. – V. 46. – № 5. – P. 268–276.
2. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1 (71). – С. 63–67.
3. Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55. – № 10. – С. 53–57.

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Богатырев Анатолий Владимирович – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

УДК 004.4'242

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВЫПОЛНИМОСТИ
КВАНТИФИЦИРОВАННОЙ БУЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ
КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ПО СЦЕНАРИЯМ РАБОТЫ И ТЕМПОРАЛЬНЫМ СВОЙСТВАМ
Е.В. Панченко, В.И. Ульянов**

Рассматривается вопрос о применении управляющих автоматов при построении систем со сложным поведением. Предложен метод построения управляющего конечного автомата по заданному множеству сценариев работы и темпоральным свойствам, которые должны выполняться в результирующем автомате. Метод основан на сведении к задаче выполнимости квантифицированной булевой функции. Описан алгоритм построения данной функции и основные составляющие полученной булевой формулы.

Ключевые слова: кванторы, булева функция, управляющие конечные автоматы, верификация.

Парадигма автоматного программирования используется для реализации систем со сложным поведением во многих промышленных отраслях. В настоящее время существуют системы, насчитывающие более тысячи различных состояний, при записи их поведения в виде конечного автомата. Одним из ис-

пользуемых подходов при попытке задать параметры системы на вход сторонним приложениям является передача сценариев работы системы. Как правило, данный метод позволяет эффективно создавать автоматизированные системы по сценариям работы, описываемым, например, в функциональной спецификации продукта. Тем не менее, не все свойства системы можно описать с помощью сценариев работы.

В работе [1] было спроектировано решение, позволяющее решить задачу построения автомата по сценариям работы с помощью сведения ее к задаче о выполнимости булевой формулы (SAT). После этого программный решатель находил набор значений, на котором данная формула истинна, и на основании полученного примера алгоритм строил необходимый автомат.

Полученный автомат удовлетворял заданным сценариям работы, однако зачастую не соответствовал изначальным бизнес-требованиям, поскольку лист сценариев оказывался неполон. Целью настоящей работы является модификация метода построения управляющих автоматов, а именно, добавление возможности использования формул линейной темпоральной логики (LTL) в качестве дополнительного инструмента описания требуемой работы автомата.

На вход разрабатываемой программе подается список сценариев, а также набор темпоральных свойств работы системы. Сценарием работы является последовательность $T_1 \dots T_n$ троек $T_i = \langle e_i, f_i, A_i \rangle$, где e_i – входное событие; f_i – булева формула от входных переменных, задающая охранное условие; A_i – последовательность выходных воздействий. Автомат, находясь в состоянии S , удовлетворяет элементу сценария T_i , если из S исходит переход, помеченный событием e_i , последовательностью выходных воздействий A_i и охранным условием, тождественно равным f_i как булева формула. Автомат удовлетворяет сценарию работы $T_1 \dots T_n$, если он удовлетворяет каждому элементу данного сценария, находясь при этом в состояниях пути, образованного соответствующими переходами.

На формат входных LTL-формул наложено ограничение в виде невозможности использовать характеристики состояний автомата, поскольку на этапе задания логики состояний еще нет. Однако это позволяет задавать свойства общего формата, что может быть полезно при создании систем с нуля. Было принято решение использовать в качестве переменных LTL-формул входные и выходные воздействия.

Таким образом, синтаксис входных данных включает в себя:

- булевы связки ($!$, \wedge , \vee);
- темпоральные операторы X (next) и U (until);
- выведенные темпоральные операторы F (future), G (globally in the future), R (release);
- предикаты:
 - $wasEvent(e)$ – переход совершен по событию e ;
 - $wasAction(z)$ – время перехода было вызвано выходное воздействие z .

Пример входного темпорального свойства, используемого при верификации автомата управления дверьми лифта в работе [2]:

$$F!(wasEvent(e) \wedge ! wasAction(z)).$$

Разработанное программное средство в несколько шагов производит построение искомого конечного автомата, удовлетворяющего входным данным.

1. С помощью разработанного в работе [1] алгоритма по заданным сценариям работы создается булева формула, содержащая логические переменные $y_{a,b,e,f}$ (для каждой пары состояний результирующего автомата S_a и S_b , каждого события e , каждой формулы f , встречающейся в заданных сценариях работы), соответствующие наличию перехода из состояния S_a в состояние S_b , помеченного событием e и формулой f в результирующем автомате.
2. С использованием подхода верификации моделей с ограничением на длину вычислений – Bounded Model Checking – входные темпоральные свойства «разворачиваются» в булеву функцию. Для этого используется понятие «обратного цикла» и ограничение его глубины поиска.

«Обратный цикл» – это цикл, образованный ребром, ведущим из какого-либо состояния пути в состояние, лежащее на данном пути ранее, как показано на рисунке ниже.

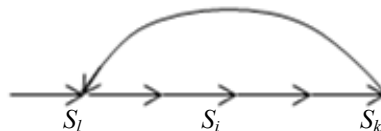


Рисунок. Пример обратного (k, l)-цикла

Логика линейного времени предполагает, что некоторое утверждение будет выполняться для всех путей. В связи с этим обычно в работах верификации доказательство построено от противного, т.е. проверяется существование пути, на котором выполняется отрицание LTL-формулы. Однако данный подход возможен только при верификации уже построенных автоматов. В нашем случае автомат еще только должен быть построен, поэтому используется квантор всеобщности, позволяя найти такое ре-

- шение формулы (значения переменных $y_{a,b,e,f}$), чтобы темпоральные свойства выполнялись на всех путях построенного конечного автомата.
- Для ограничения времени работы алгоритма устанавливается ограничение на длину цикла k . Таким образом, темпоральные свойства с помощью разложения на композицию темпоральных и булевых предикатов «разворачиваются» по циклу в формулу, размер которой линейно зависит от размера начальной формулы и константы k .
 - Полученные формулы объединяются в одну квантифицированную булеву функцию, проверяющую все бесконечные и конечные пути в радиусе k и содержащую кванторы существования и всеобщности.
 - Для решения полученной формулы используется специализированное программное средство. Полученные значения входных переменных с квантором существования используются для построения искомого управляющего конечного автомата.

Разработан алгоритм автоматизированного построения управляющих автоматов по сценариям работы и темпоральным свойствам, основанный на сведении данных задач к проблеме о разрешимости квантифицированной булевой формулы.

- Ulyantsev V., Tsarev F. Extended Finite-State Machine Induction using SAT-Solver // Proceedings of the Tenth International Conference on Machine Learning and Applications, ICMLA 2011, Honolulu, HI, USA // IEEE Computer Society, 2011. – V. 2. – P. 346–349.
- Егоров К.В., Шалыто А.А. Совместное применение генетического программирования и верификация моделей для построения автоматов управления системами со сложным поведением // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 81–89.

Ульянцев Владимир Игоревич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ulyantsev@rain.ifmo.ru

Панченко Елена Владиславовна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ranchenko@rain.ifmo.ru

УДК 004.056

ОБЩАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.Н. Коваль, И.С. Лебедев

Предложена модель угроз информационной безопасности робототехнических систем. Ее построение базируется на типовых элементах – программах, ресурсах и структурах.

Ключевые слова: робототехническая система, модель угроз информационной безопасности.

Для широкого применения робототехнических систем (РТС) в различных сферах деятельности необходима формализация технических требований к ним на этапах разработки, внедрения, эксплуатации. Вместе с тем на ранних этапах жизненного цикла разработчика, как правило, уделяют недостаточно внимания вопросам информационной безопасности (ИБ) [1], вследствие чего требуется оценка различных аспектов ИБ, необходимых для выполнения технических и технологических задач.

Анализ ИБ предполагает оценку угроз ИБ от различных факторов, оказывающих влияние на состояние системы [2]. Для описания модели ИБ будем считать, что РТС включает в себя управляющую систему, объект управления и каналы передачи данных. Для каждой составной части РТС, вне зависимости от ее архитектурных и технических особенностей, элементами воздействия угроз могут быть программы, структуры и ресурсы.

На рисунке приведена общая модель ИБ РТС. Совокупность условий и факторов, создающих опасность нарушения ИБ РТС, определяется:

- угрозами, обусловленными воздействием субъектов (персонала или противоборствующей стороны) на систему управления, объекты управления, каналы;
- угрозами, возникающими вследствие особенностей технических характеристик функционирования технических средств (интенсивности сбоев, отказов);
- угрозами, связанными с внешней средой, где применяются РТС.

Реализация угроз может осуществляться посредством уязвимостей, которые в РТС могут иметь:

- программы, обеспечивающие контроль, передачу, прием, анализ команд;
- структуры, определяющие их формы, архитектуры построения и организации действий;
- ресурсы, обеспечивающие выполнение задач.

Представленная общая модель позволяет выделить одинаковые составляющие элементы объектов РТС, что позволяет применять общеизвестные подходы к обеспечению ИБ автоматизированных систем.

Работа выполнена в рамках НИР № 610454 «Разработка интеллектуальных технологий управления, навигации и обработки информации с применением к мобильным робототехническим системам и комплексам».

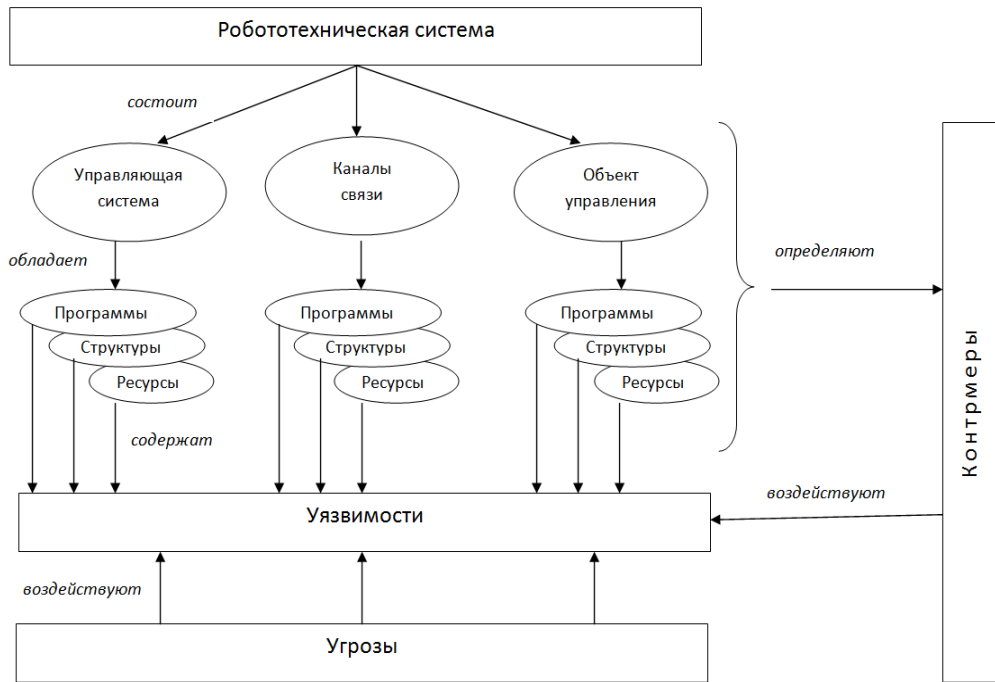


Рисунок. Общая модель ИБ РТС

1. Малюк А.А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 280 с.
2. Гвоздев А.В., Зикратов И.А., Лебедев И.С., Лапшин С.В., Соловьев И.Н. Прогнозная оценка защищенности архитектур программного обеспечения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 126–130.

Коваль Елена Николаевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, зав. лабораторией, lena@cit.ifmo.ru

Лебедев Илья Сергеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, доцент, lebedev@cit.ifmo.ru

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

MICROLENS ARRAYS WITH "FLOATING" IMAGE EFFECT

V. Balya, V. Bulgakova, I. Denisyuk

The article deals with simple and effective method for obtaining of high-density surface coverage microlens raster by polymer film thermoforming using the matrix obtained by laser ablation of black rubber by laser graver. Microlens arrays with focal lengths equal to 0.5 mm and 1.2 mm depending on heat treatment duration are received. Microlens rasters provide visible motion effect: with observation point changing, various parts of micro image become visible and as the visible image is enlarged and synthesized from great number of elementary images, the "floating" image effect is observed. Microlens rasters were used for metal master matrix fabrication by electrotyping and subsequent obtaining of polymeric copies on film by hot embossing.

Keywords: thermoforming, microlens, laser ablation, polymer, motion effect.

Vera Balya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Vera_Balya@mail.ru

Vera Bulgakova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, vera-bulgakova@yandex.ru

Igor Denisyuk – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, Professor, D.Sc, Professor, denisiuk@mail.ifmo.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

FABRICATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF METAL NANOANTENNAS FOR PHOTOABSORPTION INCREASING IN ACTIVE LAYER OF THIN- FILM SOLAR BATTERY

M. Guzhva, A. Denisyuk, D. Permyakov, P. Voroshilov, S. Frank

The article is dedicated to fabrication and diagnostics development methods of the metallic nanoantennas for thin-film solar batteries application. Fabrication results of the experimental samples consisting of single nanoantennas and two-dimensional arrays of antennas by focused ion-beam milling are presented. The optimal regimes of metal deposition on the semiconductor substrate are selected, which gives the possibility for thin silver films deposition (50-70 nm thick) with low relative surface roughness and grain sizes less than 20 nm. The optimal doses of ion beam irradiation are found for gold and silver films of 50 nm thickness which lead to correspondence between the dimensions of actual fabricated nanoantenna and its design model with accuracy less than 10 nm. The fabricated nanoantenna clusters are investigated by scanning electron microscopy and atomic force microscopy in semi-contact mode. The unique techniques of scanning near-field optical microscopy are developed using these samples. These techniques give the possibility for direct measurement of local electromagnetic fields at optical frequencies with resolution less than 100 nm. The developed technological regimes of low-roughness thin - film deposition, focused ion beam milling and the methods of fabrication parameters control of the nanoantennas will be used upon fabrication of nanoantenna coatings of this particular design for effectiveness growth of the thin - film solar batteries. The developed fabrication and diagnostics methods make it possible to create other golden and silver structures with high arbitrary resolution (less than 20 nm) for various plasmonics and nanophotonics applications.

Keywords: nanoantennas, thin-film solar batteries, energy effectiveness, atomic force microscopy, electron microscopy.

Mikhail Guzhva – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior research fellow, PhD, m.guzhva@phoi.ifmo.ru

Andrey Denisyuk – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, aidenisyuk@gmail.com

Dmitry Permyakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, d.permyakov@phoi.ifmo.ru

Pavel Voroshilov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, pavel.voroshilov@phoi.ifmo.ru

Sofia Frank – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Sur-ok@yandex.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

TORQUE RIPPLING OF UNIPOLAR MULTI-POLE ELECTRIC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

O. Epifanov, I. Salova, Yu. Grechushkin

The article deals with the physical and mathematical model of inactive three-phase unipolar multi-pole permanent magnet motor; equivalent replacement circuit of magnetic circuit and analytical expressions describing spectral structure of residual torque are received. It has been found that the torque is caused by the presence of harmonics of the air gap magnetic conductivity and their interaction with each other. The residual torque is the alternating function, changing from the rotor rotation angle with the dominant frequency in the sixth harmonic of the angular range pole pitch. It was determined and analytically shown that the angular deviation from the predetermined position of the toothed rotors relatively to each other causes the third harmonic of residual torque changing.

Keywords: unipolar torque motor, rippling, residual torque, spectral structure, double-ended serration, air gap permeability.

Oleg Epifanov – Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, Section head, PhD, epifanov_eok@mail.ru, office@eprib.ru

Irina Salova – Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, research engineer, PhD, senior staff scientist, Salova_irine@mail.ru, office@eprib.ru

Yuri Grechushkin – Concern «Central Scientific and Research Institute "ELEKTROPRIBOR" JSC, engineer, office@eprib.ru

SOFTWARE APPLICATION FOR QUADROPTER FLIGHT ALONG PREDETERMINED TRAJECTORY

P. Gritsenko, A. Kremlev, G. Shmyhelskiy

Software product including visualizer and quadrocopter control program for solving the problem of the flight path formation and tracking is developed. Application is designed to control quadrocopter automatically in places where it is impossible to capture the signal from a satellite (GPS) or to use extra sensors, and a detailed plan of a site or a building is given. It can also be used in various technical systems to solve problems in situations when a human intervention is necessary. Algorithm implementation in respect to the quadrocopter makes it possible to avoid the constant communication of quadrocopter with the station and consequently reduces power consumption and has the advantage of protection from interception. Testing of this software application has been made on Ar Drone quadrocopter manufactured by Parrot Company. As a result of the program testing, quadrocopter repeated the desired trajectory with an error of no more than 5%.

Keywords: quadrocopter, trajectory control, UAV, flight along the trajectory.

Polina Gritsenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Polina.gritsenko@gmail.com

Artem Kremlev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, kremlev_artem@mail.ru

Grygoriy Shmyhelskiy – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Gri6ka16@gmail.com

RESEARCH OF PROCESSES IN CONTINUOUS SYSTEMS WITH MULTIPLE COMPLEX CONJUGATED EIGENVALUES OF THEIR STATE MATRIX

T. Akunov, N. Dudarenko, N. Polinova, A. Ushakov

The steady continuous system is considered which state matrix has spectrum of the multiple complex conjugated eigenvalues and their multiplicity is equal to a half dimension of its state vector. The special attention is paid to the situation when the modulus of an eigenvalue real part is less than unit. It is established that in the case of a small oscillativity of eigenvalues there is a noticeable overshoot in processes on norm of free transient motion on state vector and the more its multiplicity and imaginary part and the less on the modulus is the real component of an eigenvalue the more is the size of the overshoot.

Keywords: complex conjugated eigenvalues, multiplicity, free transient motion, norm, overshoot.

Taalaybek Akunov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, doctoral candidate, PhD, takunov@mail.ru

Natalia Dudarenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, dudarenko@yandex.ru

Nina Polinova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, polinova_nina@mail.ru

Anatoly Ushakov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ushakov-AVG@yandex.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES
AN OPTIMAL STRATEGY CREATION IN THE ITERATED PRISONER'S DILEMMA AGAINST
THE FIXED SET OF ENEMIES

M. Pinsky, D. Stepanov

The article deals with a strategy for iterated prisoner's dilemma, which is gaining maximum points against a fixed set of enemies: classic strategies, ZD-strategy and against itself, providing an evolutionary stability in the given set. A finite automata is given corresponding to the strategy, and the way of its design is described by genetic algorithm.

Keywords: iterated prisoner's dilemma, finite automata, genetic algorithms, ZD-strategy.

Mikhail Pinsky – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, mikhailpinsky@gmail.com

Denis Stepanov – «Concern NPO «Aurora», chief specialist, PhD, Associate professor, denis_v_stepanov@hotmail.com

FLOW ROUTING MODEL WITH LOAD BALANCING BY QUEUE LENGTH IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

T. Vavenko, V. Sterin, A. Simonenko

The article deals with the flow model of multipath routing with load balancing by the length of the queue for software-defined networks. Analysis results of the proposed model for a fragment of the Google corporation telecommunication network are shown. Comparison of the routing solution by the proposed model and the routing model with load balancing based on coefficient of maximum link utilization is done.

Keywords: software-defined networks, multipath routing, load balancing, multipath delay, coefficient of maximum link utilization, queue length, traffic.

Tatiana Vavenko – Kharkov National University of Radioelectronics, postgraduate, tv_vavenko@mail.ru

Vjacheslav Sterin – Kharkov branch of “Kievstar”, Director, sterin@journal.kh.ua

Alexander Simonenko – Kozhedub Air Force University, Krarkov, applicant, simonenko@journal.kh.ua

SELECTION SCREENING OF TRANSDUCERS CONNECTION IN A DUPLICATED COMPUTING COMPLEX

E. Alsuf'yev, V. Bogatyrev

Variants of transducers connection to controlling microprocessor devices in the workflow automation control system are analyzed. Reliability and cost parameters of different engineering solutions are considered. The article focuses on a temperature control system analysis, as the most common workflow control system of different industrial areas.

Keywords: transducer, workflow control system, computing complex, reliability, redundancy.

Evgeny Alsuf'yev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate; “Rakurs-Engineering” Ltd., Head of Research Department, alsufyev@mail.ru

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

SYNCHRONIZING OF PHYSIOLOGICAL SIGNALS FOR HUMAN INTELLECTUAL ACTIVITY BY MULTIFUNCTIONAL MEASURING COMPLEX

M. Marusina, N. Suvorov, A. Kozachenko, D. Tolkovich

The article deals with development results of multi-measurement system for recording of physiological and information signals describing the psycho-physiological state of a person at the current instant time. The complex gives the possibility to synchronizing and real-time processing of all recorded physiological parameters during the study of the subject creative activity. The scheme and components of multifunctional complex are described. Results of the fixing and processing of physiological signals recorded during intense intellectual activity are given.

Keywords: measuring complex, synchronization, encephalography, physiological signals, psychophysiological states.

Maria Marusina – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, marusina_m@mail.ru

Nikolai Suvorov – Institute for Experimental Medicine of the RAMS, Laboratory head, D.Sc., Professor, nbsuvorov@yandex.ru

Alexander Kozachenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a_kozachenko@mail.ru

Dmitriy Tolkovich – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, PYBY@inbox.ru

LASER AND BIOMEDICAL TECHNOLOGIES

RADIATION INFLUENCE IN THE RANGE OF 0.05 ÷ 2 THZ ON MITOCHONDRIAL MEMBRANE POTENTIAL

M. Tsurkan, I. Kudryavtsev, M. Serebryakova, Yu. Nesgovorova, A. Trulyov, I. Nazarova, O. Smolyankaya, P. Nazarov, A. Polevshchikov

Application of terahertz (THz) radiation sources is rapidly growing in recent years. It is estimated that it can be used in medical diagnosis of skin diseases and skin cancer. However, the divergent data on the effects of THz radiation put in question the safety of its use. To assess the effects of THz radiation at the cellular level, the mitochondrial membrane potential and the permeability of the cell membrane of certain cells of transplanted crops, and thymocytes and splenocytes of mice were investigated after exposure by flow cytometry. It was shown that the terahertz radiation with 30, 2 and 0.1 mW radiated power and 1 minute exposure have neither significant effect on the change in the functional activity of mitochondria, nor gives integrity on their bilipid outer membranes. Including, no statistically significant changes in the ratio of live and at different stages of apoptotic cells were found.

Keywords: terahertz (THz) radiation, medicine, biological effects, membrane potential, membrane permeability.
Maria Tsurkan – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, engineer, tsurkan.maria@yandex.ru

Igor Kudryavtsev – Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), senior research scientist, PhD; Far East Federal University, Saint Petersburg State University, Associate professor, igorek1981@yandex.ru

Maria Serebryakova – Saint Petersburg State University laboratory assistant-researcher, m-serebryakova@yandex.ru

Yuliya Nesgovorova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, yulyanesgovorova@yandex.ru

Andrei Trulyov – Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), scientific researcher, trulioff@gmail.com

Inga Nazarova – Saint Petersburg State University, student, oblaka12@mail.ru

Olga Smolyanskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, o_smolyanskaya@mail.ru

Peter Nazarov – Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), Head of laboratory; Saint Petersburg State University, Professor, MD, Professor, peter_nazarov@mail.ru

Alexander Polevshchikov – Far Eastern Federal University, Department Head, Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), leading scientific researcher, D.Sc., Professor, Alexpol512@yandex.ru

STUDY OF ENTROPY PROCESSES IN THE HUMAN BODY BY ITS PHYSIOLOGICAL RHYTHMS

A. Ivanova

Results of experimental measurements of the electrocardiogram for different states of patients are illustrated. Results of the phase portraits (attractor) design are given. It is shown that, depending on the condition of the patient (severe, moderate, satisfactory, etc.) the value of the correlation dimension and the phase trajectories are changed.

Keywords: entropy, correlation dimension, attractor, fractal.

Almira Ivanova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Ahbka.gav@mail.ru

NONLINEAR DYNAMICAL MODELING FOR INTERACTION PROCESSES OF HUMAN BREATHING AND TACHYCARDIA ON THE BASIS OF GIVEN MEASUREMENTS

G. Luk'yanov, S. Polishchouk

The article deals with nonlinear dynamic model on the basis of method algorithm Non-Linear Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Inputs [1], which connects interaction measurements results of the human respiratory and cardiac systems. Application of this model is shown for description of these processes and their interconnection demonstrating how human inhalation and exhalation correlate with cardiac cycle. The model is used for both separate description of breathing and tachycardia processes and their interconnection. This model is suggested for the compressed general description of human organism functioning features and for description of concrete person features. Filtering application of the joint model for breathing and tachycardia according to the given method makes it possible to decompose obtained model to independent initial models.

Keywords: nonlinear dynamic modeling, NARMAX, temperature measurement results, cardiogram, synchronization.

Gennady Luk'yanov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, Gersey@yandex.ru

Sergei Polishchouk – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Gersey@yandex.ru

INFLUENCE ANALYSIS OF LOW INTENSITY TERAHERTZ RADIATION ON LYMPHOCYTES EARLY ACTIVATION MARKERS

**M. Tsurkan, I. Kudryavtsev, M. Serebryakova, A. Trulyov, A. Snegova, O. Smolyankaya,
A. Polevshchikov, N. Balbekin**

There is the evidence of terahertz radiation effect on blood elements in literature. This study is focused on determining the level of cell surface markers for lymphocyte activation when exposed to terahertz broadband in the range of 0,05-1,2 THz. In the course of the study, two antigens - CD38 and CD69 were selected - increase of the expression level of these markers gives the possibility to evaluate the functional state of the cells in culture conditions in vitro. Obtained data indicate that terahertz radiation with power density equal to 9.55, 0.63 and 0.03 mW/cm² in 1 minute does not alter the functional activity of lymphocytes.

Keywords: terahertz (THz) radiation, medicine, blood, lymphocytes, activation markers.

Maria Tsurkan – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, engineer, tsurkan.maria@yandex.ru

Igor Kudryavtsev – Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), senior research scientist, PhD; Far East Federal University, Saint Petersburg State University, Associate professor, igorek1981@yandex.ru

Maria Serebryakova – Saint Petersburg State University laboratory assistant-researcher, m-serebryakova@yandex.ru

Andrei Trulyov – Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), scientific researcher, trulioff@gmail.com

Anastasiya Snegova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, snegova_anastasia@mail.ru

Olga Smolyanskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, o_smolyanskaya@mail.ru

Alexander Polevshchikov – Far Eastern Federal University, Department Head, Institute of Experimental Medicine of the NorthWest Branch of the Russian Academy of Medical Sciences (IEM NWB RAMS), leading scientific researcher, D.Sc., Professor, Alexpol512@yandex.ru

Nikolai Balbekin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, engineer, godnikolay@yandex.ru

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

PHOTO STIMULATED MODIFICATION OF STRUCTURE FOR NANOMETER LAYERS OF POLYMETHINE DYE MOLECULES

A. Starovoytov, E. Kaliteevskaya, V. Krutyakova, T. Razumova

The article deals with mechanisms of changes in the conformational composition and spatial reorientation of organic thin film nanocomponents by laser radiation. Layer restructuring model due to the resonant photo excitation is suggested. Two stereoisomers and two aggregated forms are identified in the layers of polymethine molecules on a glass substrate. Each component can have two spatial orientations, differing in the angles of the optical transition dipole moment. Photo excitation causes irreversible change of layer orientation, and mutual transformation of layer nanocomponents.

Keywords: polymethine dye, isomer, aggregate, thin films, molecular layers, laser, absorption.

Anton Starovoytov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, anton.starovoytov@gmail.com

Elena Kaliteevskaya – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, lenakalit@yandex.ru

Valentina Krutyakova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, krutyakova@mail.ru

Tatyana Razumova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, chief researcher, D.Sc., senior staff scientist, tatyana_razumova@mail.ru

EXPERIMENTAL STUDY OF MOLYBDENUM CARBIDE FORMATION IN THE IMPULSE ELECTRIC EROSION DISCHARGE

A. Tikhomirov, V. Sysun, L. Aleshina, A. Ustinov

The article deals with the possibility of molybdenum carbide formation in the impulse electric erosion discharge on the basis of Blumlein modified circuit. Obtained samples of the material were investigated by X-ray diffraction. Analysis of diffraction patterns showed that the film of carbides is formed on the molybdenum surface during the reaction with carbon by electric erosion discharge.

Keywords: molybdenum carbide, impulse electric erosion discharge.

Alexander Tikhomirov – Petrozavodsk State University, Associate professor, PhD, sasha.82@mail.ru
Valery Sysun – Petrozavodsk State University, Department head, D.Sc., Professor, vsysun@psu.karelia.ru
Lyudmila Aleshina – Petrozavodsk State University, Associate professor, PhD, Professor, aleshina@psu.karelia.ru
Anton Ustinov – Petrozavodsk State University, senior lecturer, Anton-ustinov@psu.karelia.ru

COMPACT NUCLEAR-MAGNETIC SPECTROMETER FOR EXPRESS-CONTROL OF LIQUID MEDIUM

V. Davydov, A. Karseev

Design of the handheld nuclear – magnetic spectrometer for the measuring of spontaneous T_1 and transverse T_2 relaxation times of the liquid medium in low magnetic field $B_0 = 55$ mTl is developed. Julotto method for the measuring of T_1 in developed spectrometer design in low magnetic field is implemented for the first time. This method was previously applied only for measurement in strong magnetic field for solid samples in which the ratio of the relaxation times is different from liquid mediums. The nuclear magnetic resonance signal acquisition scheme is developed and realized. This makes it possible to carry out relaxation times measuring for small amount of the liquid medium (10 – 15 gram) when ratio of signal/noise is about 1.5.

Keywords: nuclear magnetic resonance, spectrometer, magnetic field, relaxation time, acquisition scheme, monitoring.

Vadim Davydov – National Research University “Saint Petersburg State Polytechnic University”, Associate professor, PhD, Davydov_vadim66@mail.ru

Anton Karseev – National Research University “Saint Petersburg State Polytechnic University”, student, antonkarseev@gmail.com

POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON POLYAMIDE 12 FILLED WITH NICKEL NANOPARTICLES

E. Shapoval, V. Zuev

The article deals with synthesis method of nickel nanoparticles (particle mid-size diameter equal to 20-30 nm) with carbon-coated core shell (1-2 nm depth). The polymer nanocomposites based on polyamide 12 matrix filled with 0.1-1 wt% of nickel particles was synthesized. The nanocomposites were prepared by in situ polymerization. The modulus of elasticity and tensile strength of the polymer nanocomposites are improved by about 15-20%.

Keywords: nickel nanoparticles, polymer nanocomposites, nanocomposites mechanical properties, microencapsulation method.

Ekaterina Shapoval – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, katenka-shapoval@yandex.ru

Vyacheslav Zuev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., zuev@hq.macro.ru

KINETICS OF OXIDIZING ANILINE POLYMERIZATION. STATISTICAL ANALYSIS OF POLYANILINE NANOSTRUCTURE GROWTH

A. Podshivalov, V. Zuev, S. Bronnikov

Kinetics of polyaniline polymerization was studied for the first time by direct method including electron microscopy with the following statistical analysis of micro photos of polyaniline granulated nanostructure in different time intervals and analytical description of histograms for polyaniline granules sizes by thermodynamic aggregation model. Dependencies of granules average size and the amount of granules from polymerization time are shown. Three phases of process are stated: formation and growth of primary granules-they are formed and grow during the first three minutes of reaction on the padding; formation of solid polyaniline film – on the third minute granules have grown up to their maximum sizes; formation of new granules on a solid film begins from the fourth minute.

Keywords: polyaniline, oxidizing polymerization kinetics, topochemical reaction, morphology, statistical analysis, thermodynamics of irreversible processes.

Alexander Podshivalov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, podshivalov2005@mail.ru

Vyacheslav Zuev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., zuev@hq.macro.ru

Sergei Bronnikov – Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Science, leading research scientist, D.Sc., Professor, sergei_bronnikov@yahoo.com

TOTAL PHOSPHORUS ESTIMATING IN RIVER LUGA, GULF OF FINLAND, BY LANDSAT 5 (TM) SATELLITE IMAGERY

E. Kapralov, E. Kunaeva, M. Kustikova, M. Mednik

Phosphorus, flowing via rivers into the Gulf of Finland, is a major source of nutrients, and in some cases the limiting factor for the growth of algae which is known as eutrophication. Remote sensing of total phosphorus by

Landsat 5 (TM) data, can help to give a better understanding of the process of eutrophication. The method, originally described and previously applied for Chinese rivers, is later transferred and applied to three different rivers flowing into the Baltic Sea on the territory of Sweden. The results show that by measuring of chlorophyll – a transperance and content by remote sensing model is able to explain 62% of the variance in total phosphorus.

Keywords: remote sensing, Landsat 5 (TM), total phosphorus, chlorophyll-a, eutrophication, river Luga, Gulf of Finland.

Evgeny Kapralov – Saint Petersburg State University, Department head, PhD, Associate professor; Space and Geoinformation Technologies Resource Center (RC), Deputy director, egk06@yandex.ru

Elena Kunaeva – Saint Petersburg State University, Space and Geoinformation Technologies Resource Center (RC), remote sensing data processing specialist, e.kunaeva@spbu.ru

Marina Kustikova – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Deputy department head, PhD, Associate professor, marinakustikova@mail.ru

Mikhail Mednik – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, postgraduate, leaderfins@gmail.com

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION LASER - ULTRASONIC GENERATOR APPLICATION FOR INTENSE - DEFORMED CONDITION DEFINITION OF PRODUCTS SPECIAL MATERIALS

V. Bychenok, I. Kinzhagulov, I. Berkutov, M. Marusin, I. Shcherba

The article deals with main methods applicable for definition of intense - deformed condition of products special materials. Experimental researches of speed dependence of elastic waves distribution from tension in various samples are conducted and revealed the advantage of laser - ultrasonic diagnostics method realized by means of volume waves, to nondestructive control of mono axial tension in a metal structures. The specified advantages of laser and ultrasonic diagnostics method and the received research results on samples from hot-rolled sheet steel of 08kp 2 mm thick and AK33CB steel of 20 mm thick while stretching tests showed sensitivity not less than 3,5 m/s.

Keywords: intense deformed condition, nondestructive control, laser and ultrasonic diagnostics method.

Vladimir Bychenok – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, bychenok-vladimr@mail.ru

Igor Kinzhagulov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, kinzhiki@mail.ru

Igor Berkutov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, chigivara56712@mail.ru

Mihail Marusin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, mishasp06@mail.ru

Irina Shcherba – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sherbairina@mail.ru

GENETIC ALGORITHM APPLICATION FOR PARAMETRIC SYNTHESIS OF EXTRUDER DESIGN

N. Mustyukov, T. Zubkova

The extrusion process is the process of products recycling in the extruder by softening or plasticization and giving them a desired shape when bursting through the die head, section of nozzles corresponds to the configuration of the product. The resulting products after extrusion processing are complex chemical composition and possess a complex of various properties that make up the totality of the product quality and should be taken into account when calculating the technological machines and improving them.

This article describes the use of genetic algorithm and methods of expert evaluation at the stage of parametric synthesis of auger pressing mechanism design. In particular, software solution for maximization problem of extruder efficiency by varying the geometrical and structural parameters is given. As a result of this software application it was managed to increase the efficiency of basic construction (3.1%) to 6.8% by adjusting the size of the screw, the conversion designs meet the imposed restrictions. Obtained results prove that software can be used by engineers for the design of new and improvement of existing extrusion technique models.

Keywords: extrusion technique, genetic algorithm, optimization model, simulation model, software system.

Nail Mustyukov – Orenburg State University, postgraduate, 256nail@mail.ru

Tatiana Zubkova – Orenburg State University, Professor, D.Sc., Professor, bars87@mail.ru

TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR CREATION OF FUNCTIONAL ELEMENTS ON GYRO UNITS SURFACES

R. Muhametov, O. Yulmetova, A. Scherbak

Results of technology development for creation of functional elements in form of drawings with given configuration on precise surfaces of gyro units made from various materials are presented. The possibility of laser marking usage as a method to solve the problem of the formation of functional drawings with required

shape and contrast is discussed. Modes and features of precise surfaces laser marking for the units made from fragile magnetic materials and chrome-nickel steel are shown.

Keywords: laser marking, fragile materials, inclinometer, gyroscopic instruments.

Rustem Muhametov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, 0189@mail.ru

Olga Yulmetova – State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI “Elektropribor”, senior research scientist, PhD, olga@yulmetova.ru

Aleksander Scherbak – State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI “Elektropribor”, leading scientific researcher, D.Sc., AScherbak1946@gmail.ru

INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

IMPROVING ACCURACY OF PART-OF-SPEECH TAGGING IN DLP MORPHOLOGICAL ANALYZER

S. Lapshin, I. Lebedev

This article provides a method of accuracy improving for part-of-speech tagging in DLP morphological analyzer. Fulfilled experiments prove this fact. This method has an important advantage – no preliminarily formatted texts or other specially prepared data are needed, except for morphological dictionaries.

Keywords: part-of-speech tagging, automated parts of speech definition, morphological analysis.

Sergei Lapshin – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, sv.lapshin@gmail.com

Ilya Lebedev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, associate professor, D.Sc., Associate professor, lebedev@cit.ifmo.ru

MULTI-AGENT SYSTEM FOR INFORMATION MANAGEMENT AND ANALYTICAL SUPPORT OF REGIONAL SECURITY "SECURE VIRTUAL REGION"

A. Masloboev

For decision-making information support and coordination degree enhancement of the regional security subjects a prototype of network-centric multi-agent information and analytical environment "Secure Virtual Region" with unified access point based on web-technologies for management support of regional security has been developed. Distributed information environment software core and components form hierarchical multilayer virtual space of the region which is represented as an integration framework of problem-oriented situational coalition-based multi-agent systems used for risk-sustainable regional development management support.

Keywords: multi-agent technologies, regional security, management, information and analytical support, ontologies, polymodel complexes, region virtual environment.

Andrey Masloboev – Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, senior research fellow; Kola Branch of Petrozavodsk State University, Department head, PhD, Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

INFORMATION THREATS REPRESENTATION ON THE BASIS OF OPEN ENVIRONMENT MODEL

V. Kuznetsov, O. Lukinova

The article deals with the reference model of the open environment which treats an information system as a combination of two components: application-oriented and platform which functionality is definitely structured. Three-dimensionality of the model gives the possibility to display in the same terms functionality of such aspects as information system safety. Basic opportunity to structure information threats (attacks) on model components that opens possibilities of formalization of attack development in the environment of an information system, simulation of counteraction of protective mechanisms and threats is shown. Algorithms solutions of the tasks connected to attacks identification are proposed there by means of parameter vectors creation that influence on the safety and generation chains of attacks in an information system. Results received in part 3 of the article can be used for solution of a wide range of tasks, in particular, for an assessment of possibility of attack implementation and efficiency of protective mechanisms.

Keywords: computer attacks, open system, attack model, identification of attacks.

Vladimir Kuznetsov – Moscow State Technical University of Radiotechnique, Electronics and Automatics (MSTU MIREA), postgraduate, kuznecov.vladimir.00@mail.ru

Olga Lukinova – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, senior research scientist, PhD, lobars@mail.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION**CONCEPT OF PROTECTION SYSTEM FOR CHILDREN'S SAFETY ACCESS TO INFORMATION
IN EDUCATION INSTITUTES USING RFID-TECHNOLOGY****R. Zharinov, Yu. Trifonova**

There are types of information, which dissemination are prohibited or restricted depending on the age group of children under the Russian law. The authors proposed concept of a system that makes it possible to ensure the safety use of information in the organization of multi-user access for different age categories of users by the existing infrastructure of person's identification. In particular, attention is given to the core modules: information filtering and users authorization. Filtering module provides the ability to detect and restrict access to illegal content on the basis of intelligent search of the root words and using white or black lists. Security policy for the text filtering using DLP-system database is developed. At the same time fundamental changes in the operation scheme of the system are related with a redirection mode of content filtering. Authorization occurs using the existing infrastructure of contactless smart cards enabled with radio frequency identification (for example, smart cards used for going by public transport). The purpose of system development is getting such parameters as implementation costs minimization and also no need in qualified personnel for its maintenance.

Keywords: DLP-system, radio frequency identification (RFID), information security, information filtering.

Roman Zharinov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, postgraduate, roman@vu.spb.ru

Yulia Trifonova – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, assistant, Julia@vu.spb.ru

BRIEF REPORTS**OPTIMAL RESERVATION OF AGGREGATED RADIAL CHANNELS****V. Bogatyrev, A. Osipov**

The article deals with the problem of optimal redundancy for aggregated radial channel in view of the reliability and the frames mean residence time under the constraint of funds for system implementation and restrictions on the minimum number of aggregated lines in the channels, determined on the basis of exchange stationary conditions.

Keywords: multiple redundancy, optimization, aggregated channel, reliability.

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Andrey Osipov – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, osipov-andrey@mail.ru

FUNCTIONAL RELIABILITY OF REAL-TIME SYSTEMS**V. Bogatyrev, A. Bogatyrev**

The article deals with reliability estimation of the system at the requirement of the critical queries with limited delay, taking into account the readiness of the system when requested and its reliability during waiting and request service.

Keywords: reliability, reliability index, real time, computer system.

Vladimir Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Anatoly Bogatyrev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

**QUANTIFIED BOOLEAN FUNCTION SATISFIABILITY SOLVING METHODS APPLICATION
TO EXTENDED FINITE-STATE MACHINE CREATION BASED ON SCENARIOS AND TEMPORAL
PROPERTIES****E. Panchenko, V. Ul'yantsev**

The question of automatic control systems application for design of systems with complex behavior is considered. A method of control state machine design for a given set of scenarios and temporal properties that must be met in the resulting automaton is proposed. The method is based on the reduction to the problem of quantified Boolean function satisfiability. The algorithm of function construction and the basic components of the resulting Boolean formula are described.

Keywords: quantifiers, Boolean function, control finite-state machines, verification.

Elena Panchenko – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, panchenko@rain.ifmo.ru

Vladimir Ul'yantsev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ulyantsev@rain.ifmo.ru

GENERAL MODEL OF ROBOTIC SYSTEMS INFORMATION SECURITY

E. Koval, I. Lebedev

The model of information security threats for robotic systems is offered. Its design is based on standard elements: programs, resources and structures.

Keywords: robotic system, model of information security threats.

Elena Koval – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory head, lena@cit.ifmo.ru

Il'ya Lebedev – Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, D.Sc., Associate professor, lebedev@cit.ifmo.ru