

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 1 (53)

2020

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Янг Ч.-В., Вяткин В. В.*
Использование языка SPARQL в онтологическом моделировании
мультиагентных систем в семантическом Web..... 4

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

- Безяев В. С., Макарычев П. П.* Идентификация параметров моделей
объектов методом регрессионного анализа 19
- Данилин А. И., Иванова Я. А.* Методы диагностики динамических
давлений газовых потоков в области периферийных зазоров
лопаточных колес турбомашин 28
- Ашанин В. Н., Мельников А. А., Ларкин С. Е., Аравин Н. А.*
Микропроцессорная лабораторно-исследовательская система
для анализа влияния спектра и уровня оптического излучения
на рост растений в помещениях закрытого грунта 36
- Токарев Н. Н.* Влияние отражений от стволов деревьев
на сигналообразование радиоволновых средств
обнаружения метрового диапазона в лесу 43
- Доросинский А. Ю.* Применение физико-технических методов
для выявления причин отказов проволочных резисторов..... 58
- Мясникова Н. В., Берестень М. П., Приймак А. А.*
«Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации 70
- Лаврентьева А. С., Морозов О. А., Чуманкин Ю. Е.* Влияние деформации
рефлектора антенны на диаграмму направленности 78
- Юрков Н. К., Штыков Р. А.* Совершенствование системы управления
топочным оборудованием за счет использования новой
математической модели смешивания газов 90

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Иванова Т. Н., Ратников И. А., Муйземнек А. Ю.</i> Совершенствование методов решения типовых конструкторских и технологических задач путем применения компьютерного моделирования.....	103
---	-----

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 1 (53)

2020

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

- Dubinin V. N., Dubinin A. V., Yang C.-W., Vyatkin V. V.* The use of sparql language in ontological modeling of multi-agent systems in semantic Web 4

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

- Bezyaev V. S., Makarychev P. P.* Identification of object model parameters by the method of regression analysis..... 19
- Danilin A. I., Ivanova Ja. A.* Diagnostic methods of gas flows' dynamic pressure in the peripheral gaps of turbo machines 28
- Ashanin V. N., Mel'nikov A. A., Larkin S. E., Aravin N. A.* Microprocessor laboratory research system for analysis of the spectrum influence and level of the optical radiation on plant growth in indoor soil..... 36
- Tokarev N. N.* The impact of reflections from trees' trunks on signal formation of radio-wave devices of meter range detection in the woods 43
- Dorosinskij A. Ju.* Application of physical and technical methods for identifying wire resistors' failures causes 58
- Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Priymak A. A.* A "fast" extreme filtering algorithm 70
- Lavrent'eva A. S., Morozov O. A., Chumankin Yu. E.* The impact of antenna reflector deformation on direction diagram..... 78
- Yurkov N. K., Shtykov R. A.* The improvement of control system of furnace equipment by using the new mathematical model of gas mixing..... 90

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

- Ivanova T. N., Ratnikov I. A., Muyzemnek A. Yu.* The methods improvement for solving typical design and technological tasks by using computer modeling..... 103

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.75 : 004.89

DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-1

В. Н. Дубинин, А. В. Дубинин, Ч.-В. Янг, В. В. Вяткин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА SPARQL В ОНТОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ В СЕМАНТИЧЕСКОМ WEB

Аннотация

Актуальность и цели. Широкое распространение концепции мультиагентных систем и технологий семантического Web, а также начало их активного совместного использования в проектировании и реализации информационных систем требует разработки новых адекватных методов и средств их проектирования.

Материалы и методы. Исследования выполнены с использованием онтологического и агентно-ориентированного подходов к моделированию, технологий семантического Web, а также положений теории графовых трансформаций и теории сетей Петри.

Результаты. Предложен подход к онтологическому моделированию мультиагентных систем семантического Web. Данный подход продемонстрирован на примере мультиагентной системы в сети Smart Grid для выполнения маркетинговых операций. В рамках предложенного подхода разработан метод реализации сетей Петри на основе онтологий и языка SPARQL Update.

Выводы. Предложенный мултимодельный подход к онтологическому моделированию систем является эффективным, поскольку позволяет описание не только статистики системы, но и ее динамики, что было продемонстрировано на примерах. Язык SPARQL Update является наиболее удобным и мощным средством реализации данного подхода.

Ключевые слова: онтология, моделирование, мультиагентные системы, семантический Web, трансформация графов, RDF, сети Петри, Smart Grid, SPARQL Update.

V. N. Dubinin, A. V. Dubinin, C.-W. Yang, V. V. Vyatkin

THE USE OF SPARQL LANGUAGE IN ONTOLOGICAL MODELING OF MULTI-AGENT SYSTEMS IN SEMANTIC WEB

© Дубинин В. Н., Дубинин А. В., Янг Ч.-В., Вяткин В. В., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The widespread use of multi-agent systems conception and technologies of the semantic Web, as well as the beginning of their active joint use in the design and implementation of information systems, requires the development of new adequate methods and tools for their design.

Materials and methods. The studies were performed using ontological and agent-based approaches to modelling, semantic Web technologies, as well as provisions of the theories of graph transformations and Petri nets.

Results. An approach to ontological modelling of multi-agent systems of the semantic Web is proposed. This approach is demonstrated by an example of a multi-agent system in the Smart Grid for marketing operations. Within the framework of the proposed approach, a method for implementing Petri nets based on ontologies and the SPARQL Update language has been developed.

Conclusions: The proposed multi-model approach to ontological modelling of systems is effective because it allows the description of not only the statics of the system, but also its dynamics, which was demonstrated by examples. The SPARQL Update language is the most convenient and powerful tool for implementing this approach.

Keywords: ontology, modeling, multi-agent systems, semantic Web, graph transformation, RDF, Petri nets, Smart Grid, SPARQL Update.

Введение

Концепция семантического Web, введенная в 1998 г. Тимом Бернерсом-Ли, положила начало грандиозной работы в направлении создания Web нового поколения [1]. Семантический Web представляет собой расширение существующего «синтаксического» Web, позволяющее агентам понимать смысл информации в Интернете. В технологиях семантического Web значения представляются с помощью онтологий. Онтология включает две части – Т-Box и А-Box, определяющие интенциональные и экстенциональные знания соответственно. Для описания онтологий наиболее часто используются языки RDFS и OWL [2]. В любом случае онтологию на нижнем уровне можно представить с использованием RDF. Основным понятием RDF является триплет, а в целом RDF-описание представляет собой граф (RDF-граф) [2]. Для извлечения информации из RDF-хранилищ был предложен ряд языков, среди которых выделяется язык SPARQL, одобренный консорциумом W3C [3]. В 2013 г. была принята текущая версия SPARQL 1.1, одним из важнейших расширений которой является включение в состав языка средств манипулирования RDF-данными (SPARQL 1.1 Update).

В настоящее время при построении интернет-приложений большое применение находит агентно-ориентированный подход [4]. Известно, что в мультиагентной системе агенты имеют несколько важных характеристик: автономность, ограниченность представления и децентрализация. В состав мультиагентной системы могут входить не только программные агенты, но также аппаратные агенты, роботы, люди или команды людей. Структура агента, как правило, предполагает наличие у него определенного интеллекта. Предполагается, что в среде семантического Web агенты могут иметь или использовать онтологические базы знаний, что и определяет специфику соответствующей предметной области.

В данной статье рассматриваются подходы к моделированию мультиагентных систем на основе технологий семантического Web, причем такое мо-

делирование возможно на различных уровнях абстракции, что позволяет использовать подход как для симуляции, так и для решения задач прототипирования и реализации.

1. Метод онтологического моделирования

Для моделирования мультиагентных систем, функционирующих в среде семантического Web, предлагается использовать подход, основанный на управлении онтологиями (ontology-driven approach) [5]. При этом система представляется как онтология или совокупность взаимосвязанных онтологий, а функционирование системы – как последовательность изменения онтологий. Онтология описывает структуру системы взаимодействующих агентов, сообщения, которыми они обмениваются между собой, а также наборы данных и знаний, с которыми работают агенты. Также можно сказать, что онтология в данном случае определяет обобщенное состояние системы. В нашем случае будут использоваться только RDF(S)-онтологии, и, таким образом, состояние системы представляет собой экземпляр RDF-графа. В процессе функционирования, как правило, будет изменяться онтология A-Box, однако при радикальных изменениях, происходящих в системе, возможно также и изменение онтологии T-Box.

Для реализации трансформации онтологий предлагается использование языка SPARQL Update, являющегося на данный момент самым мощным средством преобразования RDF-графов [3]. Сам по себе язык SPARQL Update является самодостаточным для решения поставленной задачи. Однако для повышения уровня формализации и, таким образом, для увеличения качества и надежности проектов предлагается использование формальных моделей в процессе проектирования. В первую очередь это графы, системы трансформации (перезаписи) графов, а также сети Петри (СП), с помощью которых можно описать динамику функционирования систем. Следует отметить, что существует ряд работ по моделированию мультиагентных систем как с использованием систем трансформации графов (например, [6]), так и СП (например, [7]).

Попытаемся неформально установить соответствие между системами трансформации графов и языком SPARQL Update. В классических системах трансформации графов (например, AGG [8]), как правило, используется очередное выполнение правил, в результате которого изменяется основной граф. При этом порядок выполнения правил подчинен какой-либо стратегии (случайная выборка, приоритетная, по слоям, в соответствии с управляющей схемой и т.д.). В SPARQL-системе запросы типа DELETE-INSERT-SELECT представляют, по сути, специфичное правило трансформации. При этом SELECT-предложение определяет левую часть правила, а предложения DELETE и INSERT – правую часть. Выполнение одного запроса SPARQL Update можно представить как двухфазную трансформацию RDF-графа. Назовем текущий RDF-граф непосредственно перед выполнением запроса SPARQL Update исходным. Результирующий граф первоначально равен исходному.

На первой фазе производится сопоставление графа, определяемого SELECT-предложением (шаблона графа), с исходным RDF-графом. Для найденного варианта сопоставления с использования DELETE и INSERT

предложений модифицируется результирующий граф путем удаления и/или включения соответствующих вершин и дуг графа. Эта процедура повторяется для всех вариантов сопоставлений SELECT-графа с исходным графом. Важно, что трансформации на первой фазе не изменяют исходный граф. На второй фазе текущим становится результирующий граф. Очевидно, что в рамках одного запроса SPARQL Update фактически выполняется серия правил перезаписи графов.

Следует обратить внимание на сложность реализации произвольного управления выполнением правил трансформации графа в SPARQL-системе. Правило (вернее, серия правил) в SPARQL-системе выполняется однократно. Поскольку все транзакции SPARQL являются линейными (так как операторы управления выполнением транзакций отсутствуют), то в лучшем случае можно выполнить последовательность из серий правил перезаписи графов. Для организации циклических стратегий управления выполнением правил необходима разработка внешних программ (клиентов). Самым простым подходом к организации взаимодействия подобного клиента со SPARQL-сервером является использование протокола HTTP. Вместе с тем стоит отметить большую выразительную мощность языка SPARQL (в некоторых аспектах) по сравнению с системами трансформации графов за счет возможности использования подзапросов, механизмов фильтрации, группирования и сортировки, указания необязательных частей графа, возможности одновременной работы с несколькими графами.

Возможны два способа использования формальных моделей в предложенном онтологическом подходе: A1 – как основного средства описания с последующей реализацией на онтологических языках (включая SPARQL); A2 – как вспомогательного средства для описания, улучшения восприятия и, возможно, дальнейшего анализа с использованием специализированных средств. При этом A0 назовем подходом, в котором формальные модели вообще не используются.

Следует отметить, что в случаях A1 и A2 возможен *мультимодельный* подход, когда в моделировании используются разноплановые модели. Например, возможно одновременное использование онтологических и графо-трансформационных моделей, СП, а также других моделей переходов состояний. При этом существует два подхода к интеграции моделей: B1 – на уровне онтологий; B2 – на уровне реализации, причем для каждой из моделей на языке SPARQL разрабатывается собственный интерпретатор. В этом случае для перехода от одной модели к другой необходима разработка «переходников», производящих соответствующие преобразования. Например, конкретной дуге RDF-графа может быть поставлена в соответствие маркированная позиция ординарной СП, в то время как шаблону дуги RDF-графа, содержащему переменные, может быть поставлена в соответствие позиция высокоуровневой СП.

В качестве простейшего примера использования подхода A1 рассмотрим правило перезаписи RDF-графа, приведенное на рис. 1, моделирующее нормальную передачу данных с использованием коммуникационных функциональных блоков (ФБ) CLIENT/SERVER в международном стандарте IEC 61499 [9]. При приходе события-запроса REQ на ФБ CLIENT по сети TCP/IP производится передача данных на ФБ SERVER, при этом на его выходе появ-

ляется событие-индикация IND. На рис. 1 ромбами представлены экземпляры классов (иначе, индивиды).

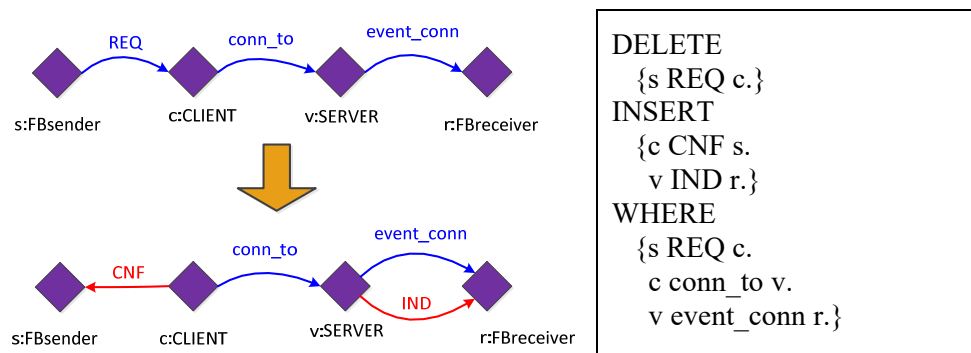


Рис. 1. Простое правило перезаписи RDF-графа и реализующий его SPARQL-запрос (справа)

На рис. 1 используются составные имена, где первая часть имени определяет имя индивида, а вторая – имя класса, к которому он принадлежит. На основе данного формального правила был построен SPARQL-запрос, представленный в правой части рис. 1. Для упрощения в запросе не указывается факт принадлежности индивидов классам, а также префиксы пространств имен. Следует сразу отметить, что выразительная мощь правила значительно возрастает, оно универсализируется при использовании переменных в графе шаблона. Для модификации правила в данном направлении необходимо перед именами индивидов поставить знак «?», например: $?s \text{ REQ } ?c$.

В качестве формальной модели в подходе A1 могут быть выбраны СП. На рис. 2 приведена ординарная СП, а на рис. 3 – высокоуровневая СП, моделирующие правило из рис. 1.

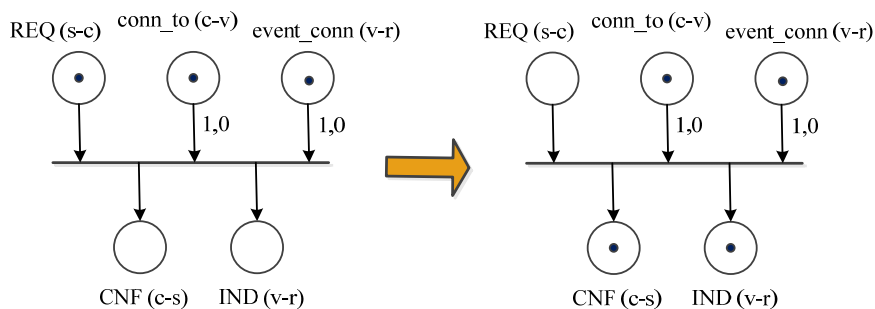


Рис. 2. Моделирование правила из рис. 1 с использованием ординарных сетей Петри

Из особенностей моделирования можно выделить следующее. Позиция ординарной СП моделирует RDF-триплет, а позиция высокоуровневой СП – шаблон триплета с переменными. Причем в последнем случае учитывается маркировка исходящих дуг. Маркировка позиции ординарной СП показывает наличие/отсутствие конкретного RDF-триплета в хранилище, а маркировка позиции высокоуровневой СП – сами RDF-триплеты, соответствующие шаблону триплета. SPARQL-правило моделируется переходом СП. Правило раз-

решенности перехода СП соответствует паттерну графа в разделе WHERE запроса SPARQL, а правило срабатывания – разделам INSERT и DELETE.

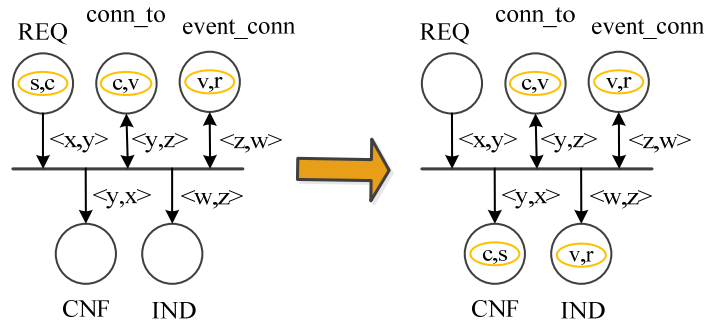


Рис. 3. Моделирование правила из рис. 1 с использованием высокоуровневых сетей Петри

Следует также отметить, что с использованием SPARQL возможно моделирование самомодифицирующихся СП, при функционировании которых меняется не только маркировка, но и структура сети. Реализация высокоуровневых СП на языке логического программирования Пролог, имеющего такую же теоретическую основу, что и онтологии (логика первого порядка), подробно рассмотрена в работе [10].

Построение интерпретатора СП на языке SPARQL, необходимом при использовании подхода A1B2, рассмотрено в разд. 3. Подход A0 и подход A2 с использованием графовых трансформаций как вспомогательной формальной модели представлен в разд. 2.

2. Онтологическое моделирование агентов сети Smart Grid

В настоящее время в области электроэнергетики все большее распространение и признание получает концепция *Smart Grid*. Под сетью *Smart Grid* понимается разумная сеть электроснабжения будущего, которая включает коммуникационную инфраструктуру и двунаправленный поток электроэнергии и предоставляет информацию в режиме реального времени для всех вовлеченных объектов [11].

Для управления сетью *Smart Grid* на нижних уровнях (уровне управления и SCADA) могут использоваться физические агенты, построенные в соответствии со стандартами IEC 61850 и IEC 61499 [12], в то время как на верхних уровнях (например, ERP) – программные агенты. Ниже в иллюстративных целях рассматривается простой пример мультиагентной системы для осуществления маркетинговых операций в *Smart Grid*. При этом предполагается, что в системе функционируют агенты разных уровней. Онтология T-Vox, описывающая структуру взаимодействующих агентов, представлена на рис. 4.

Классы агентов представлены следующим образом: агенты энергетического рынка – в виде треугольника, физические управляющие агенты – в виде квадрата. Классы, относящиеся к физическим объектам, представляются в виде прямоугольников, окружностей и звездочек. В собственно класс физических сущностей как подклассы входят класс единичных физических сущ-

ностей и класс их агрегаций. Примерами физических сущностей являются дата-центры, гидроэлектростанции, солнечные батареи. Примерами агрегаций сущностей могут служить фермы (агрегаторы) солнечных батарей, виртуальные электростанции.

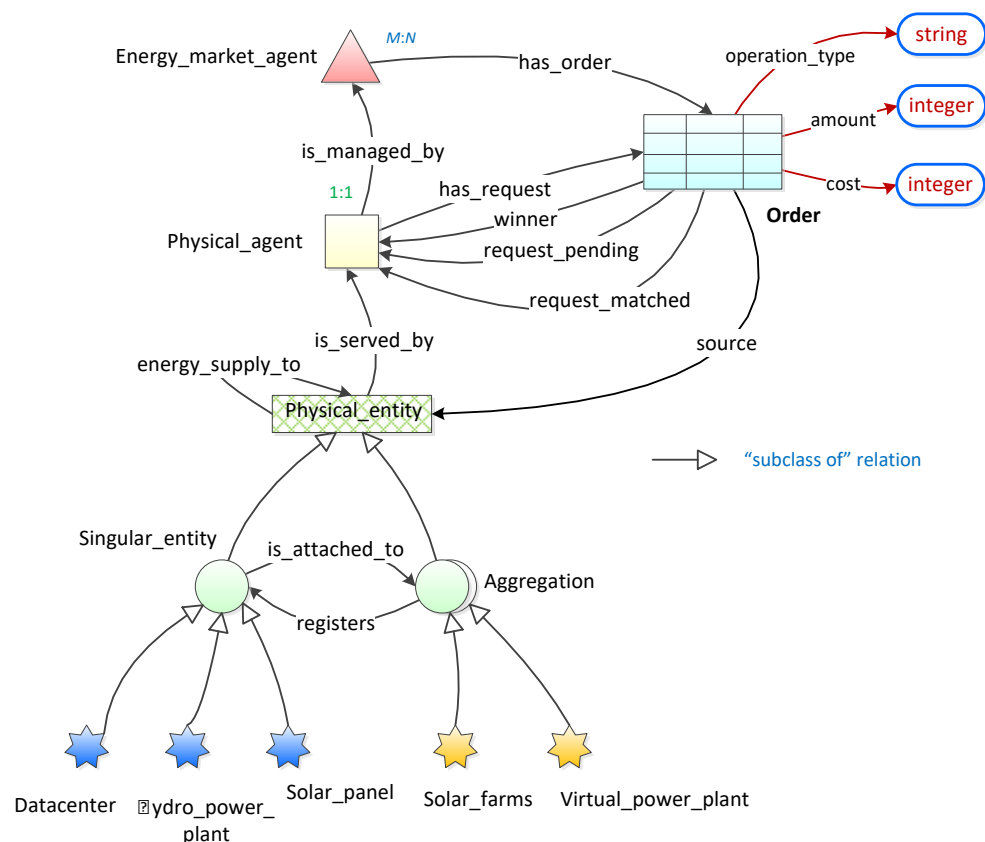


Рис. 4. Онтология, описывающая систему взаимодействующих агентов в Smart Grid

В онтологии также представлен набор данных *Order* для хранения заказов на рынке электроэнергии. Для представления типов данных в онтологии используются овалы. Объектное свойство *source* позволяет определить физическую сущность, которая генерирует запрос. Свойства по данным имеют следующую интерпретацию: *operation_type* – тип операции (продажа или покупка); *amount* – объем продаваемой или покупаемой электроэнергии; *cost* – стоимость единицы электроэнергии.

В системе агентов возможны различные сценарии функционирования, один из сценариев приведен ниже:

а) ожидается, что дата-центр как объект физического уровня будет иметь повышенную нагрузку в течение следующих 24 ч и он отправляет запрос с желаемым количеством требуемой электроэнергии своему агенту на энергетическом рынке (рыночному агенту дата-центра);

б) рыночный агент дата-центра обрабатывает запрос от агента физического уровня и декларирует этот запрос нагрузки на рынке электроэнергии;

в) происходит процесс купли-продажи, при котором каждый агент рынка может рекламировать свои генерирующие мощности и стоимость генерации;

г) после окончания маркетингового процесса «победитель» отправляет желаемую сумму генерируемой энергии своему агенту на физическом уровне;

д) если, например, некоторый агрегатор солнечных батарей становится «победителем» маркетингового процесса, то менеджер агрегатора затем объявляет желаемое количество электроэнергии на свои отдельные солнечные панели, и каждая солнечная батарея будет кооперироваться для достижения этой общей цели.

Пример создания экземпляра о777 запроса приведен ниже. Для этого используется оператор INSERT DATA:

```
INSERT DATA {m:o777 rdf:type m:Order. m:o777 m:source m:dc99.
m:o777 m:operation_type 'buy'. m:o777 m:amount 15. m:o777 m:cost 7. }
```

Фрагмент кода ниже описывает создание экземпляра торгового агента (ma49), связывание его с физическим управляющим агентом pa55, а также со своими заказами:

```
INSERT DATA {m:ma49 rdf:type m:Energy_market_agent.};
INSERT DATA {m:pa55 m:is_managed_by m:ma49.};
INSERT DATA
{m:ma49 m:has_order m:o21. m:ma49 m:has_order m:o22.
m:ma49 m:has_order m:o23. m:ma49 m:has_order m:o24.}
```

Ниже представлен SPARQL-запрос, описывающий функционирование системы в соответствии со сценарием, приведенным выше:

```
DELETE {?pa m:has_request ?o1.}
INSERT {?o2 m:winner ?pa. ?o1 m:request_matched ?pa. ?s2 m:energy_supply_to ?s1.}
WHERE
{SELECT ?o2 ?pa ?o1 ?s2 ?s1
WHERE
{?pa m:has_request ?o1. ?o1 m:source ?s1. ?o1 m:operation_type 'buy'. ?o1 m:amount
?a1.
?o1 m:cost ?c1. ?pa m:is_managed_by ?ma. ?ma m:has_order ?o2.
?o2 m:operation_type 'sale'. ?o2 m:source ?s2. ?o2 m:amount ?a2.
FILTER(?a2>=?a1)
?o2 m:cost ?c2.
FILTER(?c2<=?c1) }
ORDER BY ?c2 DESC(?a2)
LIMIT 1 }
```

Его смысл можно выразить следующим образом. Если физический агент имеет запрос на покупку электроэнергии, то определяется соответствующий рыночный агент и делается попытка найти среди его заказов такой, который полностью удовлетворяет условиям запроса и является в некотором смысле оптимальным. При этом также фиксируется, что запрос согласован. После этого физический объект – поставщик электроэнергии – напрямую связывается с физическим объектом – потребителем электроэнергии, используя свойство *energy_supply_to*. Наконец, запрос, посланный физическим агентом,

«отвязывается» от него. Условием для признания запроса победителем является минимальная стоимость и максимум объема электроэнергии. Следует отметить, что для сокращения размера SPARQL-запроса описание префиксов пространств имен опущено. В данном случае префикс m соответствует онтологии агентов T-Vox+A-Vox.

Как видно из приведенного выше запроса, отбираются решения (заказы рыночного агента), удовлетворяющие следующим условиям оптимальности:

1) указанный в запросе физического агента объем покупаемой электроэнергии должен быть не больше объема продаваемой электроэнергии, а стоимость покупаемой единицы электроэнергии должна быть больше стоимости продаваемой единицы электроэнергии в заказе рыночного агента;

2) из заказов рыночного агента, удовлетворяющих верхнему условию, отбирается заказ, имеющий минимальную стоимость продаваемой единицы электроэнергии при наибольшем объеме продаваемой электроэнергии.

Несмотря на некоторые различия в семантике выполнения классических систем трансформации графов и запросов SPARQL Update, их синтаксические представления имеют сходства, что определяет смысл использовать графическое представление для последних. Для представления правил предлагается использовать графическую нотацию, предложенную в работе [13]. При этом индивид представляется прямоугольником, в верхней части которого записывается имя класса, а в нижней – или идентификатор экземпляра, или имя переменной (через знак ?). Для представления значения свойства по данным используется овал синего цвета, внутри которого может находиться константа или переменная. Свойства представляются дугами, надписанными или именами свойств, или именами переменных.

На рис. 5 приведено графическое представление запроса SPARQL Update, представленного выше. В данном случае левая часть правила перезаписи графа приведена над стрелкой, а правая – под стрелкой. Слева от стрелки – условие применимости правила из предложений FILTER. Справа от стрелки – дисциплина упорядочения и число применений правила. Для большей наглядности для каждого индивида указан его класс (хотя в самом SPARQL-запросе триплеты, описывающие принадлежность индивида классу, отсутствуют). Генерируемые дуги в графе правой части правила отмечены красным цветом. Тестирование запроса SPARQL Update, представленного на рис. 5, было выполнено на сервере Apache Jena Fuseki.

3. Онтологическое моделирование сетей Петри

Рассмотрим моделирование и реализацию СП с использованием онтологий. Особенностью рассматриваемых СП являются наличие числовых и ингибиторных дуг, а также приоритетов переходов. Формально данный класс СП определяется следующим кортежем:

$$(P, T, X, Y, Z, W_X, W_Y, W_Z, Q, A, G, m_0),$$

где P – конечное множество позиций; T – конечное множество переходов; $X \subseteq P \times T$ – множество входных дуг переходов с порогом-минимумом (дуги с проверкой на «больше»); $Y \subseteq T \times P$ – множество выходных дуг переходов; $Z \subseteq P \times T$ – множество входных дуг переходов с порогом-максимумом (дуги с проверкой на «меньше»); $W_X: X \rightarrow N^+ \times N_0$ – функция весов дуг типа X ;

$W_Y: Y \rightarrow N^+$ – функция весов дуг типа Y ; $W_Z: Z \rightarrow N^+$ – функция весов дуг типа Z ; $Q: T \rightarrow N_0$ – функция приоритетов переходов (чем меньше значение, тем выше приоритет); m_0 – начальная маркировка. Первый компонент веса дуги типа X указывает минимальный порог для срабатывания перехода, а второй – число удаляемых меток из инцидентной дуге позиции.

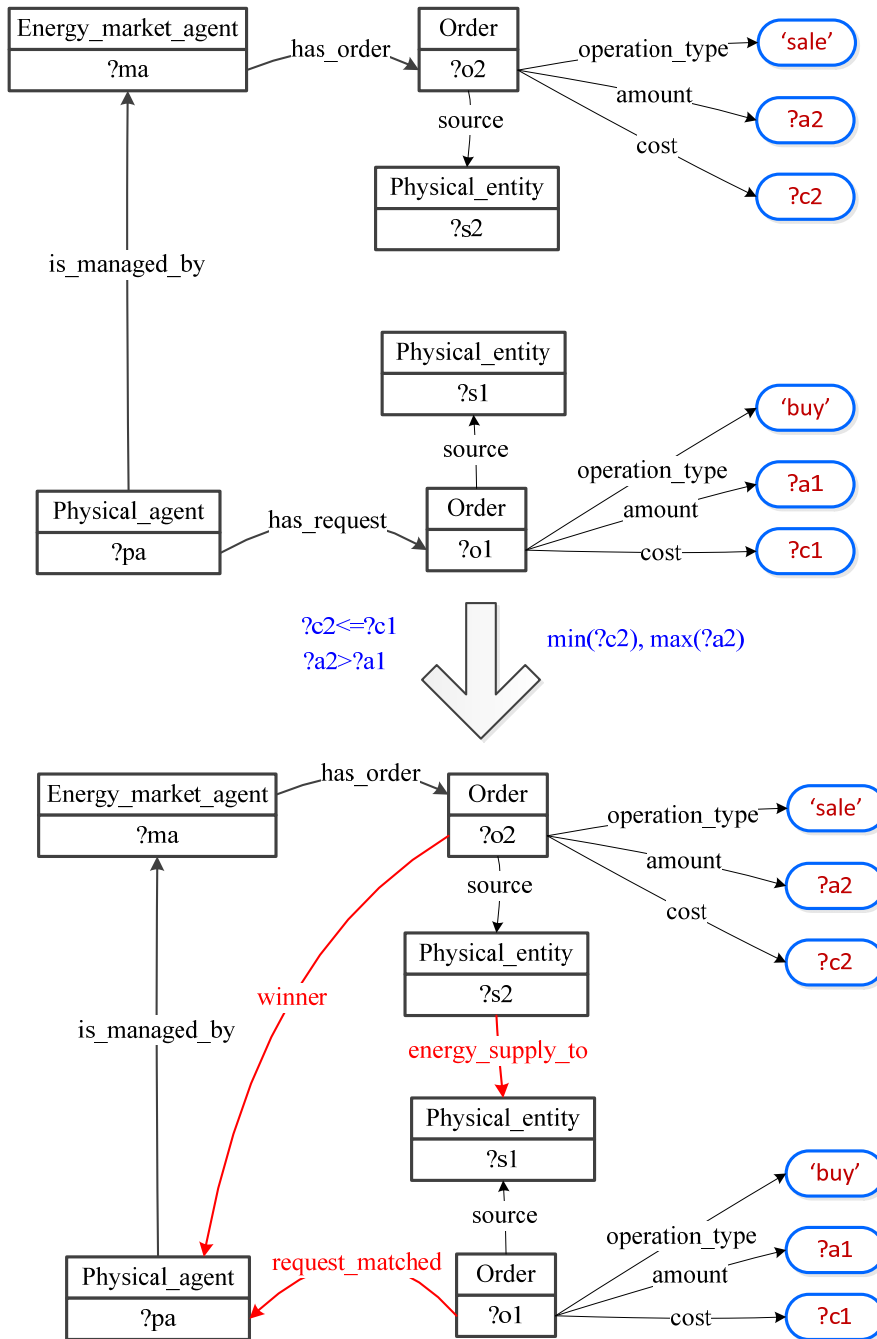


Рис. 5. Представление запроса SPARQL Update в виде правила трансформации графов

Разработана онтология уровня *T-Box* для данного класса сетевых моделей, представленная на рис. 6.

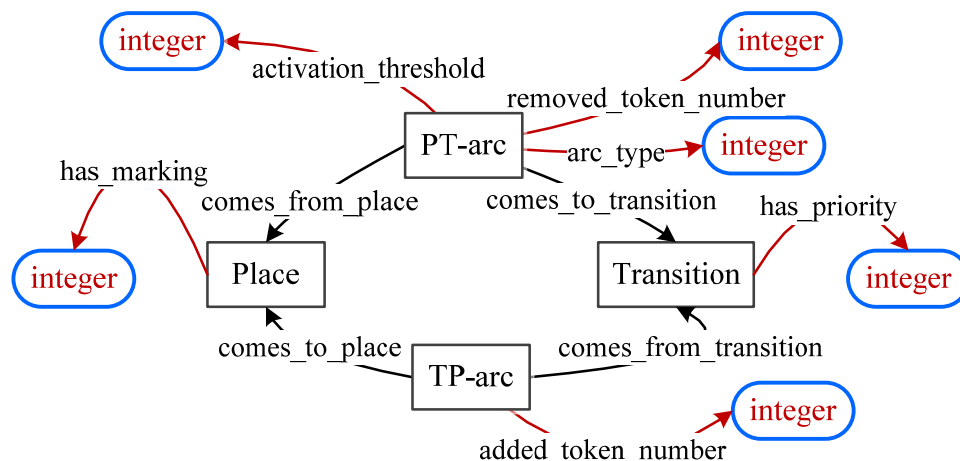


Рис. 6. Онтология T-Box сетей Петри

Она включает: четыре класса – *Place* (Позиция), *Transition* (Переход), *PT-arc* и *TP-arc* (входная и выходная дуга перехода соответственно); четыре объектных свойства – *comes_from_place*, *comes_from_transition*, *comes_to_place* и *comes_to_transition*, соответствующие дугам сетевой модели и показывающие источник и приемник дуги; шесть свойств по данным – *has_marking* (маркировка позиции), *arc_type* (тип дуги), *activation_threshold* (порог активизации входной дуги перехода), *removed_token_number* (число удаляемых из позиции меток при срабатывании перехода), *added_token_number* (число добавляемых в позицию меток при срабатывании перехода) и *has_priority* (приоритет перехода). Следует отметить, что существует ряд исследований по разработке онтологий СП разных классов (например [14]), однако все работы рассматривают только онтологическое моделирование структур сетевых моделей, но не касаются их динамики.

С использованием языка SPARQL Update можно промоделировать только одно срабатывание перехода. Однако даже эта задача является нетривиальной по ряду причин:

- 1) каждый конкретный переход имеет свою конфигурацию (т.е. множества входных и выходных дуг);
- 2) одна и та же позиция может быть для перехода одновременно входной и выходной. Для разрешения конфликта, когда в позицию одновременно должны добавляться и удаляться метки, класс входовых позиций рассматривается отдельно. Соответственно новая маркировка этих позиций вычисляется по отдельной формуле.

SPARQL-запрос, моделирующий срабатывание перехода СП, имеет следующую структуру:

- 1) фрагмент кода для удаления триплетов маркировки;
- 2) фрагмент кода для добавления триплетов маркировки;
- 3) подзапрос для определения активного перехода;

4) фрагмент кода для подсчета новой маркировки входной или входо-выходной позиции;

5) фрагмент кода для подсчета новой маркировки выходной позиции.

Первые два фрагмента:

```
DELETE
{?p1 m:has_marking ?n1. # Удалить прежнюю маркировку входных и входовыход-
ных позиций
?p2 m:has_marking ?n2.} # Удалить прежнюю маркировку выходных позиций
INSERT
{?p1 m:has_marking ?n1new. # Включить новую маркировку входных и входовыход-
ных позиций
?p2 m:has_marking ?n2new.} # Включить новую маркировку выходных позиций
```

Под активным переходом понимается разрешенный переход с максимальным приоритетом, который будет срабатывать. Переход разрешен в том случае, когда число входных дуг перехода равно числу разрешенных входных дуг перехода. При вычислении подзапроса используется группирование (GROUP BY), фильтрация (FILTER), упорядочение (ORDER BY) и ограничение числа результатов (LIMIT). В самом подзапросе используются два других подзапроса. Подзапрос для определения активного перехода:

```
{SELECT ?t
WHERE
{?t rdf:type m:Transition.
?t m:has_priority ?pr.
{SELECT ?t (COUNT(?a) AS ?na) # Подсчет числа входных дуг перехода
WHERE
{?a m:comes_to_transition ?t}
GROUP BY ?t}
{SELECT ?t (COUNT(?a) AS ?ne) # Подсчет числа разрешенных входных дуг
перехода
WHERE
{?a m:comes_to_transition ?t. ?a m:comes_from_place ?p.
?p m:has_marking ?n. ?a m:activation_threshold ?k. ?a m:arc_type ?s.
FILTER (?s='n' && ?n>=?k || ?s='i' && ?n<=?k)}
GROUP BY ?t }
FILTER (?na=?ne)} # Отбор: У разрешенного перехода все дуги должны быть раз-
решенными
ORDER BY ?pr # Упорядочить разрешенные переходы по убыванию приоритетов
LIMIT 1}
```

Ниже представлен фрагмент кода, определяющий, является ли входная позиция ?p1 также и выходной, и вычисляющий новую маркировку позиции ?p1. В данном фрагменте переменная ?k1 определяет число удаляемых меток:

```
OPTIONAL # Определяем, является ли входная позиция ?p1 также и выходной
{?a2 rdf:type m:TP-arc.
?a2 m:comes_from_transition ?t.
?a2 m:comes_to_place ?p1.
?a2 m:added_token_number ?k2a.}
BIND ((IF (bound(?k2a),?n1-?k1+?k2a, ?n1-?k1)) AS ?n1new) # Подсчет новой марки-
ровки
```

Заключение

В работе представлен подход к онтологическому моделированию мультиагентных систем с использованием языка SPARQL. Направлением дальнейших исследований является развитие мультимодельного подхода к моделированию и проектированию мультиагентных систем и киберфизических систем с использованием моделей переходов состояний, графодинамических систем и технологий семантического Web.

Библиографический список

1. Semantic Web. W3C Consortium. – URL: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>
2. **Allemang, D.** Semantic Web for the Working Ontologist. Modeling in RDF, RDFS and OWL / D. Allemang, J. Hendler. – Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 349 p.
3. **DuCharme, B.** Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1 / B. DuCharme. – O'Reilly, 2011. – 237 p.
4. **Wooldridge, M.** An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. – John Wiley & Sons Ltd, 2002. – 366 p.
5. Ontology-Driven Software Development / J. Z. Pan, S. Staab, U. Aßmann, J. Ebert, Y. Zhao. – Berlin : Springer, 2012. – 355 p.
6. **Knirsch, P.** A Note on Modeling Agent Systems by Graph Transformation / P. Knirsch, H.-J. Kreowski // Lecture Notes in Computer Science. – 2000. – Vol. 1779. – P. 79–86.
7. **Celaya, J. R.** Modeling and Analysis of Multi-agent Systems using Petri Nets / J. R. Celaya, A. A. Desrochers, R. J. Graves // Journal of computers. – 2009. – Vol. 4, № 10. – P. 981–996.
8. **Taenzer, G.** AGG: A Tool Environment for Algebraic Graph Transformation / G. Taenzer // Lecture Notes in Computer Science. – 2000. – Vol. 1779. – P. 481–490.
9. **Vyatkin, V.** IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design / V. Vyatkin. – Third Edition. – ISA, o3neida, 2015. – 261 p.
10. **Дубинин, В. Н.** Децентрализованное управление распределенными данными в локальной вычислительной сети: спецификация, моделирование, реализация и применение в распределенных вычислениях / В. Н. Дубинин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 1997. – 78 с. – Деп. в ВИНТИ 10.06.97. – № 1946-B97.
11. **Ipakchi, A.** Grid of the future / A. Ipakchi, F. Albuyeh // IEEE Power and Energy Magazine. – 2009. – Vol. 7, № 2. – P. 52–62.
12. **Zhabelova, G.** Multi-agent Smart Grid Automation Architecture based on IEC 61850/61499 Intelligent Logical Nodes / G. Zhabelova, V. Vyatkin // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59, № 5. – P. 2351–2362.
13. **Yang, C.-W.** Ontology Driven Approach to Generate Distributed Automation Control from Substation Automation Design / C.-W. Yang, V. Dubinin, V. Vyatkin // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2017. – Vol. 13, № 2. – P. 668–679.
14. **Gašević, D.** Interoperable Petri Net Models via Ontology / D. Gašević, V. Devedžić // International Journal of Web Engineering and Technology. – 2007. – Vol. 3, № 4. – P. 374–396.

References

1. Semantic Web. W3C Consortium. Available at: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>
2. Allemang D., Hendler J. *Semantic Web for the Working Ontologist. Modeling in RDF, RDFS and OWL*. Morgan Kaufmann Publishers, 2008, 349 p.

3. DuCharme B. *Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1*. O'Reilly, 2011, 237 p.
4. Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons Ltd, 2002, 366 p.
5. Pan J. Z., Staab S., Aßmann U., Ebert J., Zhao Y. *Ontology-Driven Software Development*. Berlin: Springer, 2012, 355 p.
6. Knirsch P. A., Kreowski H.-J. *Lecture Notes in Computer Science*. 2000, vol. 1779, pp. 79–86.
7. Celaya J. R., Desrochers A. A., Graves R. J. *Journal of computers*. 2009, vol. 4, no. 10, pp. 981–996.
8. Taenzer G. *Lecture Notes in Computer Science*. 2000, vol. 1779, pp. 481–490.
9. Vyatkin V. *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems Design*. Third Edition. ISA, o3neida, 2015, 261 p.
10. Dubinin V. N. *Detsentralizovannoe upravlenie raspredelennymi dannymi v lokal'noy vychislitel'noy seti: spetsifikatsiya, modelirovanie, realizatsiya i primeneniye v raspredelennykh vychisleniyakh* [Decentralized direction of distributed data in a local area network: specification, modeling, implementation and application in distributed computing]. Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhnol. un-ta, 1997, 78 p. Dep. v VINITI 10.06.97, no. 1946-V97. [In Russian]
11. Ipekchi A., Albuyeh F. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2009, vol. 7, no. 2, pp. 52–62.
12. Zhabelova G., Vyatkin V. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012, vol. 59, no. 5, pp. 2351–2362.
13. Yang C.-W., Dubinin V., Vyatkin V. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2017, vol. 13, no. 2, pp. 668–679.
14. Gašević D., Devedžić V. *International Journal of Web Engineering and Technology*. 2007, vol. 3, no. 4, pp. 374–396.

Дубинин Виктор Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.victor@gmail.com

Dubinin Viktor Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computer engineering,
Penza State University (40, Krasnaya
street, Penza, Russia)

Дубинин Алексей Викторович

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: dubinin.aleksey@gmail.com

Dubinin Aleksey Viktorovich

Student, Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Чен-Вэй Янг

постдок, кафедра «Ответственные
коммуникации и вычисления»,
Технический университет Лüleо
(Швеция, г. Лüleо, ул. Регнбогсаллен,
корп. А)

E-mail: chen-wei.yang@ltu.se

Chen-Wei Yang

Postdoctoral researcher, sub-department
of responsible communications
and computations, Lulea University
of Technology (building A,
Regnbogsallen street, Lulea, Sweden)

Вяткин Валерий Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра «Ответственные коммуникации
и вычисления», Технический
университет Лулео (Швеция, г. Лулео,
ул. Регнбогсаллен, корп. А)

E-mail: valeriy.vyatkin@ltu.se

Vyatkin Valeriy Vladimirovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of responsible
communications and computations,
Lulea University of Technology (building A,
Regnbogsallen street, Lulea, Sweden)

Образец цитирования:

Дубинин, В. Н. Использование языка SPARQL в онтологическом моделировании мультиагентных систем в семантическом Web / В. Н. Дубинин, А. В. Дубинин, Ч.-В. Янг, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 4–18. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-1.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.5.015.4

DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-2

В. С. Безяев, П. П. Макарычев

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Аннотация.

Актуальность и цели. Рассматривается процедура идентификации параметров моделей динамических объектов методом регрессионного анализа. Приводится обоснование и выбор структуры, типов компонентов наилучшей дискретной модели в виде разностных уравнений n -го порядка. Обсуждается последовательность оценки численных значений параметров дискретной модели объекта, соответствия этих параметров экспериментальным данным. Предлагается интегральный квадратичный критерий оценки степени адекватности модели с использованием измерений в дискретные моменты времени. Используется базовый подход параметрической идентификации – метод наименьших квадратов, который при соблюдении линейности и дискретности обеспечивает простое и универсальное решение. Рассматриваются вопросы оценки параметров непрерывных моделей на основе значений параметров дискретной модели.

Результаты. Разработана процедура оценки параметров дискретной и непрерывной моделей динамического объекта на основе результатов наблюдения за входной и выходной переменной на заданном интервале времени.

Выводы. Структура регрессионной модели должна быть согласована со структурой непрерывной и дискретной модели исходя из предполагаемого состава полюсов и нулей. Количество нулей определяется из условия минимума среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной. Оптимальное значение полюсов и нулей определяется методом полного перебора возможных вариантов.

Ключевые слова: регрессионный анализ, математическая модель динамического объекта, идентификация параметров модели, непрерывная модель, дискретная модель.

V. S. Bezyaev, P. P. Makarychev

IDENTIFICATION OF OBJECT MODEL PARAMETERS BY THE METHOD OF REGRESSION ANALYSIS

© Безяев В. С., Макарычев П. П., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The procedure of identification of parameters of models of dynamic objects by the method of regression analysis is considered. The substantiation and choice of structure, types of components of the best discrete model, in the form of difference equations of the order are given. The sequence of estimation of numerical values of parameters of discrete model of object, correspondence of these parameters to experimental data is discussed. We propose an integral quadratic criterion for assessing the adequacy of the model using measurements at discrete times. The basic approach of parametric identification is used-the least squares method, which, while respecting linearity and discreteness, provides a simple and universal solution. The questions of estimation of parameters of continuous models on the basis of values of parameters of discrete model are considered

Results. The procedure of estimation of parameters of discrete and continuous models of dynamic object on the basis of results of observation of input and output variable on the set interval of time is developed.

Conclusions. The structure of the regression model must be consistent with the structure of the continuous and discrete models based on the expected composition of the poles and zeros. The number of zeros and zeros is determined from the condition of the minimum standard deviation of the calculated values from the observed values of the output variable. The optimal value of the poles and zeros is determined by a complete search of possible options.

Keywords: regression analysis, mathematical model of dynamic object, identification of model parameters, continuous model, discrete model.

Введение

Задача об идентификации параметров моделей динамических объектов может быть решена методами регрессионного анализа или воздействия на вход сигнала [1–3]. При регрессионном анализе данные состоят из значений зависимой выходной переменной и независимой входной переменной. Регрессионная модель есть функция независимой переменной и параметров с добавленной случайной переменной. Параметры модели настраиваются таким образом, что модель наилучшим образом аппроксимирует выходные данные. Критерием качества оценки параметров модели объекта, как правило, служит среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной. Предполагается, что значение выходной переменной в каждый момент времени есть сумма значений входной переменной, значений входной и выходной переменных, задержанных на интервалы времени, кратные шагу дискретизации Δt и случайной величины. Регрессионный анализ может использоваться для параметрической идентификации непрерывных и дискретных моделей динамических объектов [4, 5].

Постановка и решение задачи

Предположим, что по результатам наблюдения за функционированием объекта зафиксированы значения входной $\tilde{x}_k = \tilde{x}(k\Delta t)$ и выходной $\tilde{y}_k = \tilde{y}(k\Delta t) + \tilde{\varepsilon}(k\Delta t)$ переменных в дискретные моменты времени $k\Delta t$, которые приведены в табл. 1. Наблюдения проведены при наличии шума, характеризуемого случайной переменной $\varepsilon(k\Delta t)$.

Графики наблюдаемых переменных $\tilde{x}_k, \tilde{y}_k + \tilde{\varepsilon}_k$ приведены на рис. 1. На основе анализа значений и графиков переменных практически невозможно

определить структуру и параметры модели: количество полюсов и нулей, вид корней характеристического уравнения. В связи с этим целесообразно определить максимально допустимое количество полюсов n и нулей m . Для практической реализации параметрической идентификации можно принять $n_{\max} = 4$, $m_{\max} = 3$ и установить требование $n > m$ [6, 7]. В этом случае потребуется на основе наблюдаемых значений входной и выходной переменных решить $n_{\max}(m_{\max} + 1)$ задач оценки параметров дискретной (непрерывной) модели и выбрать лучший вариант по заданному критерию.

Таблица 1

Значения наблюдаемых входной и выходной переменных

k	4	5	6	7	8	9	...	23	24	25
$\tilde{x}_k$	...	2,025	1,695	0,302	0,872	0,812	...	1,118	1,458	1,930
$\tilde{y}_k$	...	3,508	4,044	3,905	3,268	2,376	...	1,662	1,166	1,195

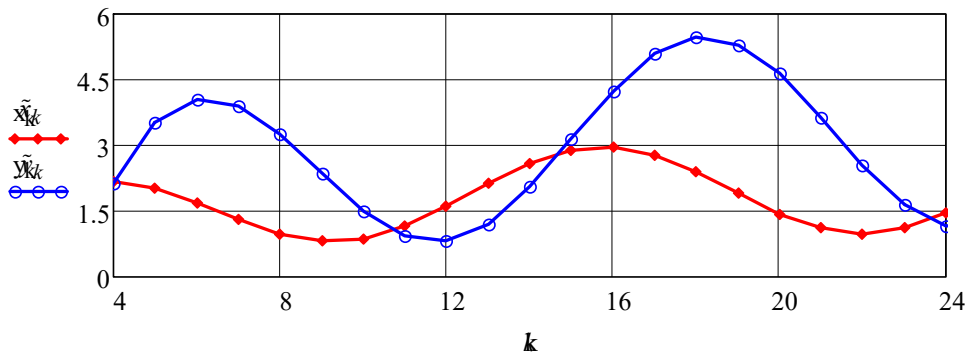


Рис. 1. Наблюдаемые переменные: $\tilde{x}_k$ – входная независимая переменная;
 $\tilde{y}_k$ – выходная зависимая переменная

Передаточная функция линейного объекта в изображении по Лапласу при выполнении условий $n \leq n_{\max}$, $m \leq m_{\max}$, $m < n$ имеет вид [6, 7]:

$$y(s) = \left[\prod_{i=1}^m (s + \beta_i) / \prod_{j=1}^n (s + \alpha_j) \right] Kx(s), \quad n \geq m, \quad (1)$$

где α_j, β_i, K – полюса, нули и коэффициент передаточной функции исследуемого динамического объекта соответственно.

В соответствии с (1) конечно-разностную модель объекта, соответствующую передаточной функции (1), можно определить в виде

$$y_k = \sum_{i=1}^n a_i y_{k-i} + \sum_{j=0}^m b_j x_{k-j} + \varepsilon_k, \quad (2)$$

где a_i, b_j – весовые коэффициенты модели; y_{k-i}, x_{k-j} – наблюдаемые входная и выходная переменные; ε_k – случайная нерегистрируемая переменная, характеризующая шум на входе объекта.

Рассмотрим решение задачи на примере данных наблюдения, приведенных в табл. 1. Предположим, что размерность передаточной функции объекта определяется значениями $n = 2$, $m = 1$ и имеет вид

$$y(s) = \left[(s + \beta_1) / \prod_{j=1}^2 (s + \alpha_j) \right] Kx(s). \quad (3)$$

В этом случае регрессионную модель линейного объекта следует представить в виде конечно-разностного уравнения [7–9]:

$$\tilde{y}_k = B_1 \tilde{y}_{k-1} + B_2 \tilde{y}_{k-2} + B_3 \tilde{x}_k + B_4 \tilde{x}_{k-1}, \quad (4)$$

где B_1, B_2, B_3, B_4 – неизвестные весовые коэффициенты.

С использованием данных из табл. 1 и выбранной структуры регрессионной модели для решения задачи параметрической идентификации методом наименьших квадратов формируем матрицы $\mathbf{Y}, \mathbf{W}$ [3, 5]:

W =		1	2	3	4
	8	3.90482	4.04451	0.97253	1.30167
	9	3.26757	3.90482	0.81167	0.97253
	10	2.37627	3.26757	0.87691	0.81167
	11	1.51024	2.37627	1.1666	0.87691
	12	0.92909	1.51024	1.62101	1.1666
	13	0.80974	0.92909	2.13757	1.62101
	14	1.20998	0.80974	2.59659	2.13757
	15	2.05383	1.20998	2.89096	2.59659
	16	3.15153	2.05383	2.95273	2.89096
	17	4.24711	3.15153	2.76996	2.95273
	18	5.08262	4.24711	2.3899	2.76996
	19	5.46178	5.08262	1.90755	2.3899
	20	5.29806	5.46178	1.4425	1.90755
	21	4.63569	5.29806	1.10981	1.4425
	22	3.64182	4.63569	0.99184	1.10981
	23	2.56162	3.64182	1.11818	0.99184
	24	1.66218	2.56162	1.45847	1.11818
	25	1.16606	1.66218	1.92982	...

Y =		1
	8	3.26771
	9	2.37637
	10	1.51071
	11	0.92939
	12	0.81014
	13	1.21061
	14	2.05435
	15	3.15174
	16	4.24721
	17	5.08257
	18	5.46189
	19	5.29794
	20	4.6362
	21	3.64191
	22	2.56168
	23	1.66236
	24	1.1659
	25	...

Матрица-столбец $\mathbf{Y}$ содержит значения наблюдаемой выходной переменной $\tilde{y}_k$ на временном интервале $[8\Delta t, 24\Delta t]$. Матрица $\mathbf{W}$ содержит 4 столбца. Два первых столбца содержат значения наблюдаемой выходной переменной $\tilde{y}_{k-1}, \tilde{y}_{k-2}$. Столбцы 3 и 4 матрицы $\mathbf{W}$ содержат значения входной наблюдаемой переменной $\tilde{x}_k, \tilde{x}_{k-1}$.

Между матрицами $\mathbf{Y}, \mathbf{W}$ и вектором неизвестных весовых коэффициентов $\mathbf{B}$ регрессионной модели существует функциональная зависимость, которая определяется векторно-матричным уравнением:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{WB}. \quad (5)$$

Решение уравнения (5) находится методом наименьших квадратов и для рассматриваемой постановки задачи регрессионного анализа определяется следующим образом [1–3]:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \cdot \mathbf{Y}. \quad (6)$$

Результаты решения задачи. Для наблюдаемых значений входной и выходной переменных, приведенных в табл. 1, выбранной структуры передаточной функции (3) вектор весовых коэффициентов регрессионной конечно-разностной модели имеет вид

$$\mathbf{B} = (B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4) = (0,305 \ -0,020 \ -1,828 \ 3,015).$$

Для оценки качества регрессионной модели значения выходной переменной рассчитывались по формуле

$$z_k = B_1 z_{k-1} + B_2 z_{k-2} + B_3 \tilde{x}_k + B_4 \tilde{x}_{k-1}, \quad z_2 = \tilde{y}_2, \quad z_1 = \tilde{y}_1, \quad k = 3, 4, \dots, 25, \quad (7)$$

на интервале времени $[8\Delta t, 24\Delta t]$.

Графики рассчитанной z_k и наблюдаемой переменной y_k приведены на рис. 2. Для лучшего восприятия рисунка график выходной наблюдаемой переменной y_k смещен на шаг дискретизации.

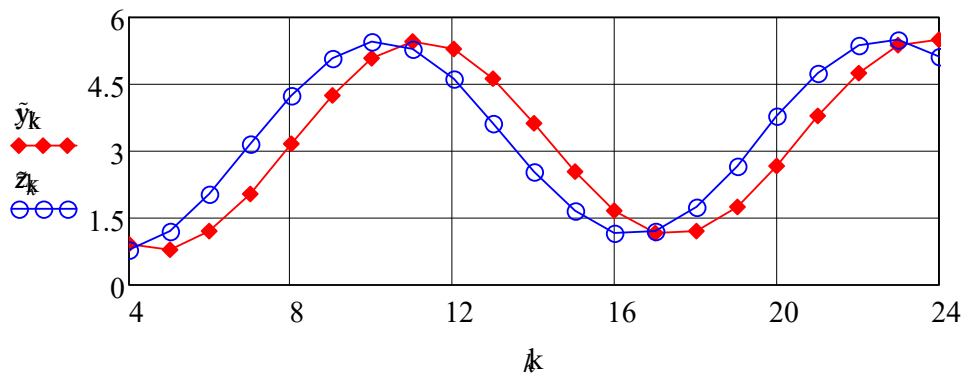


Рис. 2. Графики наблюдаемой $\tilde{y}_k$ и рассчитанной z_k выходной переменной

Количественно качество регрессионной модели экспериментально оценивалось путем расчета среднеквадратичного отклонения рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной [10, 11]. Для регрессионной модели (7) расчеты выполнялись на ограниченном интервале по формуле

$$S_r = \sqrt{(1/22) \sum_{k=3}^{24} (z_k - \tilde{y}_k)^2}. \quad (8)$$

В вычислительном эксперименте наблюдалось, что при изменении среднеквадратического отклонения случайной переменной ϵ_k от среднего значения на интервале $[0,1; 0,001]$ изменение среднеквадратического отклонения переменной z_k наблюдалось на интервале $[0,07; 0,001]$.

Рассмотрим построение дискретных и непрерывных моделей по результатам регрессионного анализа данных о наблюдаемых входной и выходной переменных. На основе заданной передаточной функции объекта (1, 3) можно составить систему уравнений [7, 8]:

$$\begin{cases} u(s) = \sum_{i=1}^m (s + \beta_i) x(s); \\ y(s) = Ku(s) / \sum_{j=1}^n (s + \alpha_j). \end{cases}$$

Примем $n = 2, m = 1$. Эта размерность модели достаточна, чтобы полно рассмотреть основные правила построения дискретной модели. В предположении, что корни вещественные, можно осуществить следующие обратные преобразования по Лапласу [4, 5]:

$$\frac{u_{k-1}^2}{(s + \alpha_1)} + \frac{Ku_k^1}{(s + \alpha_1)s} \rightarrow u_{k-1}^2 \exp(\alpha_1 \Delta t) + (\exp(\alpha_1 \Delta t) - 1) Ku_k^1 / \alpha_1; \quad (9)$$

$$\frac{y_{k-1}}{(s + \alpha_2)} + \frac{u_k^2}{(s + \alpha_2)s} \rightarrow y_{k-1} \exp(\alpha_2 \Delta t) + (\exp(\alpha_2 \Delta t) - 1) u_k^2 / \alpha_2; \quad (10)$$

$$\frac{x_{k-1}}{(s + \beta)} + \frac{u_k^1}{(s + \beta)s} \rightarrow x_{k-1} \exp(\beta \Delta t) + (\exp(\beta \Delta t) - 1) u_k^1 / \beta. \quad (11)$$

На основе результатов обратного преобразования по Лапласу и выбранной формы представления дискретных моделей (2) выражение для дискретной модели, соответствующей (7)–(9), имеет вид

$$y_k = (a_1 + a_2) y_{k-1} - a_1 a_2 y_{k-2} + b_1 b_2 d_1 x_k - b_1 b_2 d_0 x_{k-1},$$

где

$$a_1 = \exp(-\alpha_1 \Delta t), \quad a_2 = \exp(-\alpha_2 \Delta t);$$

$$b_1 = K (\exp(-\alpha_1 \Delta t) - 1) / \alpha_1, \quad b_2 = (\exp(-\alpha_2 \Delta t) - 1) / \alpha_2;$$

$$d_0 = \beta \exp(-\beta \Delta t) / (\exp(-\beta \Delta t) - 1), \quad d_1 = \beta / (\exp(-\beta \Delta t) - 1). \quad (12)$$

Из выражений (7), (12) следует, что между весовыми коэффициентами регрессионной модели (5) и параметрами передаточной функции (3) существуют функциональные связи [9], которые определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} B_1 = \exp(\alpha_1 \Delta t) + \exp(\alpha_2 \Delta t), \\ B_2 = -\exp(\alpha_1 \Delta t) \exp(\alpha_2 \Delta t), \\ B_3 = \frac{K (\exp(\alpha_1 \Delta t) - 1)}{\alpha_1} \cdot \frac{(\exp(\alpha_2 \Delta t) - 1)}{\alpha_2} \cdot \frac{\beta}{\exp(-\beta \Delta t) - 1}, \\ B_4 = -\frac{K (\exp(\alpha_1 \Delta t) - 1)}{\alpha_1} \cdot \frac{(\exp(\alpha_2 \Delta t) - 1)}{\alpha_2} \cdot \frac{\exp(-\beta \Delta t) \beta}{\exp(-\beta \Delta t) - 1}. \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) содержит 4 неизвестных параметра передаточной функции: $\alpha_1, \alpha_2, \beta, K$. Решая эту систему уравнений, получим значения параметров, определяющих весовые коэффициенты непрерывной модели и дискретных моделей с различными шагами дискретизации:

$$\alpha_1 = -5,001, \alpha_2 = -3,001, \beta = -1,001, K = 25,001.$$

Обсуждение

В соответствии с разработанной процедурой оценка параметров модели динамического объекта должна выполняться в следующей последовательности.

Анализируются данные. По результатам анализа определяются структура регрессионной модели и временной интервал для расчета параметров этой модели.

Выполняется оценка значений параметров регрессионных моделей. В предположении $1 \leq n \leq 4, 0 \leq m \leq n-1$ определяются параметры группы регрессионных моделей различной размерности (n, m):

$$\tilde{y}_k = a_1 \tilde{y}_{k-1} + \dots + a_n \tilde{y}_{k-n} + b_0 \tilde{x}_k + \dots + b_m \tilde{x}_{k-m}.$$

Для каждой регрессионной модели размерности n, m рассчитывается среднеквадратическое отклонение рассчитанных значений выходной переменной z_k от наблюдаемых значений $\tilde{y}_k$:

$$S_{n,m} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (z_k - \tilde{y}_k)^2}.$$

Значения выходной переменной рассчитывались по формуле

$$z_k = a_1 z_{k-1} + \dots + a_n z_{k-n} + b_0 x_k + \dots + b_m x_{k-m}, k = 2, 3, \dots, N; z_0 = \tilde{y}_0, z_1 = \tilde{y}_1.$$

Из множества значений $S_{n,m}$ размерности $n \times m$ находится минимальное значение среднеквадратического отклонения и определяется количество полюсов и нулей передаточной функции.

Решается система нелинейных уравнений (13) и определяются значения весовых коэффициентов ($\alpha_1, \alpha_2, \beta, K$), необходимых для построения непрерывных моделей и дискретных моделей с различным шагом дискретизации.

Заключение

Разработана процедура идентификации дискретной и непрерывной моделей динамического объекта по результатам наблюдения за входной и выходной переменной объекта в течение интервала времени. Процедура может быть использована для построения адекватных регрессионных, дискретных и непрерывных моделей. Для обеспечения адекватности моделей процедура предполагает согласование структуры регрессионной модели со структурой непрерывной (дискретной) модели исходя из предполагаемого состава полюсов и нулей. При отсутствии информации о структуре передаточной функции объекта аналитик вынужден осуществить построение группы моделей при

различных составах полюсов и нулей передаточной функции. Для выбора модели с наибольшей адекватностью можно использовать методы дисперсионного и корреляционного анализа. Количество нулей и полюсов определяется из условия минимума дисперсии (среднеквадратичного отклонения) значений рассчитанных значений от наблюдаемых значений выходной переменной. Оптимальное количество полюсов и нулей передаточной функции объекта возможно определить методом полного перебора допустимых вариантов.

Библиографический список

1. **Montgomery, D. C.** Introduction to Linear Regression Analysis, 5th Edition / D. C. Montgomery, E. A. Peck, G. G. Vining. – John Wiley & Sons, Inc, 2012. – 672 p.
2. **Giri, I.** Procedure and interpretation of linear regression analysis using STATA / I. Giri, P. Chetty. – 2017. – URL: www.projectguru.in
3. **Isermann, R.** Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications / R. Isermann, M. Münchhof. – Berlin : Springer, 2010. – 710 p.
4. **Mangan, N. M.** Model selection for dynamical systems via sparse regression and information criteria / N. M. Mangan, J. N. Kutz, S. L. Brunton, J. L. Proctor // Proceedings of the royal society a. Mathematical, physical and engineering sciences. – 2017. – Vol. 473 (2204).
5. **Макарычев, П. П.** Построение модели системной динамики по результатам регрессионного анализа / П. П. Макарычев // Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2017. – С. 113–117.
6. **Дилигенская, А. Н.** Идентификация объектов управления / А. Н. Дилигенская. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 136 с.
7. **Волгина, М. А.** Моделирование многокомпонентных систем на основе маркированных графов : монография / М. А. Волгина, П. П. Макарычев. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – 156 с.
8. **Макарычев, П. П.** Моделирование непрерывных и дискретных динамических систем : учеб. пособие / П. П. Макарычев ; под ред. Н. Н. Вашкевича. – Пенза : Изд-во Пенз. политех. ин-та, 1988. – 76 с.
9. **Макарычев, П. П.** Анализ функциональных зависимостей методами системной динамики и регрессионного анализа / П. П. Макарычев, А. Ю. Афонин, С. В. Шибанов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 11–22.
10. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит // Applied Regression Analysis. – 3-е изд. – Москва : Диалектика, 2007. – С. 912.
11. **Семенычев, В. К.** Параметрическая идентификация рядов динамики: структуры, модели, эволюция : монография / В. К. Семенычев, Е. В. Семенычев. – Самара : Изд-во СпмНЦ РАН, 2011. – 364 с.

References

1. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis, 5th Edition*. John Wiley & Sons, Inc, 2012, 672 p.
2. Giri I., Chetty P. *Procedure and interpretation of linear regression analysis using STATA*. 2017. Available at: www.projectguru.in
3. Isermann R., Münchhof M. *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications*. Berlin: Springer, 2010, 710 p.

4. Mangan N. M., Kutz J. N., Brunton S. L., Proctor J. L. *Proceedings of the royal society a. Mathematical, physical and engineering sciences*. 2017, vol. 473 (2204).
5. Makarychev P. P. *Analiticheskie i chislennye metody modelirovaniya estestvenno-nauchnykh i sotsial'nykh problem: materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Analytical and numerical methods for modeling natural-scientific and social issues: proceedings of XII International scientific and practical conference]. Penza, 2017, pp. 113–117. [In Russian]
6. Diligenskaya A. N. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya* [Identification of management objects]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2009, 136 p. [In Russian]
7. Volgina M. A., Makarychev P. P. *Modelirovanie mnogokomponentnykh sistem na osnove markirovannykh grafov: monografiya* [Simulation of multicomponent systems based on marked graphs: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, 156 p. [In Russian]
8. Makarychev P. P. *Modelirovanie nepreryvnykh i diskretnykh dinamicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Modeling of continuous and discrete dynamical systems: teaching aid]. Penza: Izd-vo Penz. politekh. in-ta, 1988, 76 p. [In Russian]
9. Makarychev P. P., Afonin A. Yu., Shibanov S. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2019, no. 2 (50), pp. 11–22. [In Russian]
10. Dreyper N., Smit G. *Applied Regression Analysis*. 3d ed. Moscow: Dialektika, 2007, pp. 912.
11. Semenychev V. K., Semenychev E. V. *Parametricheskaya identifikatsiya ryadov dinamiki: struktury, modeli, evolyutsiya: monografiya* [Parametric identification of the dynamics' series: structures, models, evolution: monograph]. Samara: Izd-vo SpmNTs RAN, 2011, 364 p. [In Russian]

Безяев Виктор Степанович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pm@pnzgu.ru

Bezjaev Viktor Stepanovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of software and computer applications,
Penza State University (40, Krasnaya
street, Penza, Russia)

Макарычев Петр Петрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой математического
обеспечения и применения ЭВМ,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: mpp@pnzgu.ru

Makarychev Pjotr Petrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of software
and computer applications, Penza
State University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Образец цитирования:

Безяев, В. С. Идентификация параметров моделей объектов методом регрессионного анализа / В. С. Безяев, П. П. Макарычев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 19–27. – DOI DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-2.

МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЗАЗОРОВ ЛОПАТОЧНЫХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются современные методы бесконтактной диагностики изделий. Предмет исследования – диагностика динамических давлений газовых потоков вблизи периферийных торцов лопаточного колеса турбомшины. Цель работы – анализ методов диагностики параметров турбомашин и разработка конструкции датчика динамических давлений.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием оптических характеристик волоконных брэгговских решеток.

Результаты. Проведен анализ бесконтактных методов диагностики, выявлен наиболее актуальный в настоящее время метод, основанный на отражающих свойствах оптического волокна. Предложена конструкция датчика динамических давлений.

Выводы. Исходя из анализа первичных преобразователей диагностики динамических давлений газовых потоков в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин был выбран датчик на оптоволокне с решетками Брэгга.

Ключевые слова: оптоволокно, динамическое давление, бесконтактные методы измерения, волоконные решетки Брэгга.

A. I. Danilin, Ya. A. Ivanova

DIAGNOSTIC METHODS OF GAS FLOWS' DYNAMIC PRESSURE IN THE PERIPHERAL GAPES OF TURBO MACHINES

Abstract.

Background. Object of research are modern methods of non-contact product diagnostics. The subject of research is a diagnostics of dynamic pressure gas flows near the peripheral ends of the bladed wheel of a turbomachine. The purpose of the work is the analysis of methods for diagnosing the parameters of turbomachines and the development of the design of a dynamic pressure sensor.

Materials and methods. The studies were carried out using the optical characteristics of fiber Bragg gratings.

Results. An analysis of non-contact diagnostic methods is carried out, the most relevant method based on the reflective properties of the optical fiber is identified. Proposed dynamic pressure sensor design.

Conclusions. Based on the analysis to diagnose the dynamic pressure gas streams in the area of the peripheral gap turbomachinery blade wheel sensor has been selected from fiber Bragg gratings.

Keywords: fiber, dynamic pressure, non-contact measurement methods, the fiber Bragg grating.

Введение

Для сокращения числа отказов, а также с целью повышения работоспособности турбомашин большое внимание уделяется контролю динамических параметров в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин, в том числе газотурбинных двигателей (ГТД) [1].

В рамках статьи обозначим основные исследуемые параметры: радиальные зазоры между лопатками ротора и поверхностью корпуса турбомшины; статические и динамические перемещения лопаток компрессора; динамические давления газовых потоков.

Диагностика в большинстве случаев проводится с помощью методов неразрушающего контроля, что позволяет осуществлять контроль исследуемых параметров в процессе эксплуатации турбомшины. Рассмотрим основные методы, применяемые для диагностики параметров в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин.

1. Контроль радиальных зазоров между лопатками ротора и поверхностью корпуса турбомшины

В процессе эксплуатации ГТД на различных режимах работы и при переходе с одного режима на другой радиальные зазоры (РЗ) между периферийными торцами лопаток ротора и внутренней поверхностью корпуса ГТД изменяются. Эффективная система управления радиальными зазорами позволяет избежать аварийных ситуаций [2]. Для измерения РЗ используются как контактные, так и бесконтактные методы измерения.

Контактный метод представлен в виде различных щупов и конструкций, которые стачиваются при взаимодействии с торцами лопаток. На смену контактному датчику измерения зазоров пришли бесконтактные: вихретоковые, основанные на одном преобразователе [3] или на двух, включенных дифференциально, преобразователях [4]; емкостные, основанные на изменении емкостного сопротивления соединения между двумя электродами датчика при прохождении лопатками области обнаружения [5], акустические [6], индуктивные и оптоэлектронные.

2. Контроль колебательных перемещений лопаток

Измерение колебательных перемещений лопаток осевых компрессоров авиационных двигателей необходимо, так как в процессе эксплуатации на лопатки воздействуют большие статические и переменные аэродинамические силы. Сильные колебания могут приводить к образованию трещин в лопатках компрессора и, в конечном счете, к выходу их из строя, что в результате может привести к полному отказу турбинного силового агрегата [7].

Для измерения вибраций лопаток в большинстве случаев так же, как и для измерения РЗ, используются бесконтактные датчики, такие как оптические, вихретоковые и емкостные. Измерение колебаний может осуществля-

ся путем определения разности между статической и динамической составляющими движения лопатки [8], а также путем вычислений, основанных на обнаружении опорной и дополнительной фазовых меток на вращающемся элементе [9].

3. Контроль динамических давлений воздушного потока

Измерение динамических давлений воздушного потока турбомашин является наименее исследованной областью в настоящее время. Использование датчиков давления позволит описать характер движения и завихренность воздушного потока вблизи периферийных кромок лопаток компрессора. В свою очередь, имея представление о величине и характере динамического движения воздушных масс в области периферийных зазоров лопаток, можно говорить о деформации лопаток.

Исходя из вышеперечисленных методов, можно выделить основные методы измерения параметров в области периферийных зазоров лопаток турбоагрегатов (рис. 1).



Рис. 1. Основные методы диагностики исследуемых параметров периферийных областей лопаток турбоагрегатов

Методы, используемые для измерения исследуемых параметров в области периферийных зазоров лопаток турбомашин, должны позволять производить измерения с минимальными погрешностями в экстремальных условиях, таких как повышенная температура и сильные вибрации. Наиболее распространены в настоящее время датчики, в основе которых лежат отражающие свойства оптоволоконна.

Датчики на основе волоконных световодов находят применение в таких отраслях промышленности, как электроэнергетика, топливная промышленность, черная и цветная металлургия, химическая и нефтедобывающая промышленность, машиностроение и промышленность строительных материалов. Широкое распространение они нашли ввиду ряда преимуществ:

- 1) широкополосность;
- 2) малый диаметр;
- 3) механическая прочность;
- 4) устойчивость к электрическим и магнитным помехам;

- 5) взрывобезопасность;
- 6) высокая коррозионная стойкость.

Одним из перспективных вариантов волоконно-оптических датчиков при исследовании механических изменений того или иного материала или газозоудного потока являются датчики с использованием в качестве чувствительного элемента волоконной брэгговской решетки (ВБР), обладающей свойством отражения излучения от решетки на определенной длине волны. Деформация (растяжение или сжатие) ВБР приводит к изменению ее периода и, следовательно, к изменению спектральных свойств излучения, отраженного от решетки.

Датчики на ВБР уже давно нашли свое применение в области измерения давления жидкостей и газов. Так, в работе [10] волоконно-оптический датчик давления (ВОДД) состоит из последовательно записанных на световоде двух ВБР, одна из которых может выполнять функцию термокомпенсации, а другая ВБР воспринимать нагрузку деформации мембраны, при этом мембрана жестко прикреплена к световоду. Конструкция ВОДД с двумя ВБР приведена на рис. 2.

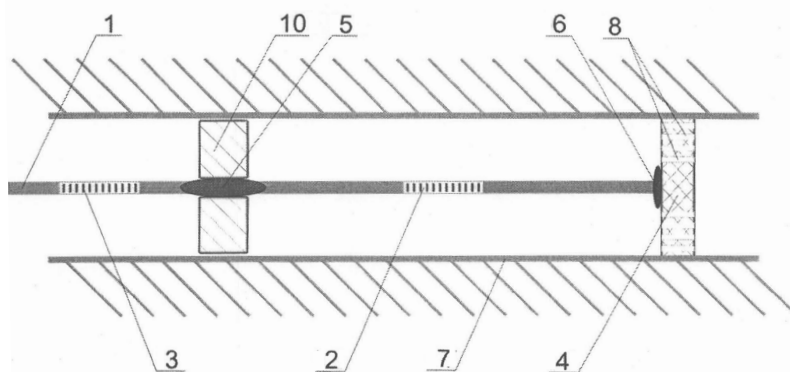


Рис. 2. Конструкция ВОДД с двумя ВБР: 1 – световод; 2 – ВБР нагрузки, 3 – ВБР термокомпенсации; 4 – мембрана; 5 и 6 – места соединения световода с корпусом и мембраной; 7 – корпус; 8 – отверстия для передачи внешнего давления; 10 – мембрана

В работе Гафнера В. А. и Смирнова И. И. волоконно-оптический датчик давления также построен на волокне с двумя решетками Брэгга в качестве чувствительного элемента. Первый участок оптического волокна с решеткой Брэгга расположен между стойками, а второй участок оптического волокна с решеткой Брэгга расположен с обратной стороны стойки. Данная конструкция обусловлена повышением точности измерения [11].

Аналогично, в устройстве для измерения давления и температуры в потоке газа и/или жидкости и стенде для испытания и измерения характеристик работы газотурбинного двигателя используется волоконно-оптический датчик с мембраной, приведенный на рис. 3 [12]. На основе изученной информации на рис. 4 представлена модель датчика динамических давлений.

Датчик включает в себя два волоконных световода, в которых расположены решетки Брэгга. Под действием воздушных масс мембрана оказывает

давление на ВБР1 первого световода, что приводит к изменению сигнала, отраженного от решетки. Помимо этого, на ВБР1 воздействует температура корпуса компрессора, т.е. выходной сигнал зависит как от деформации ВБР, так и от температуры среды.

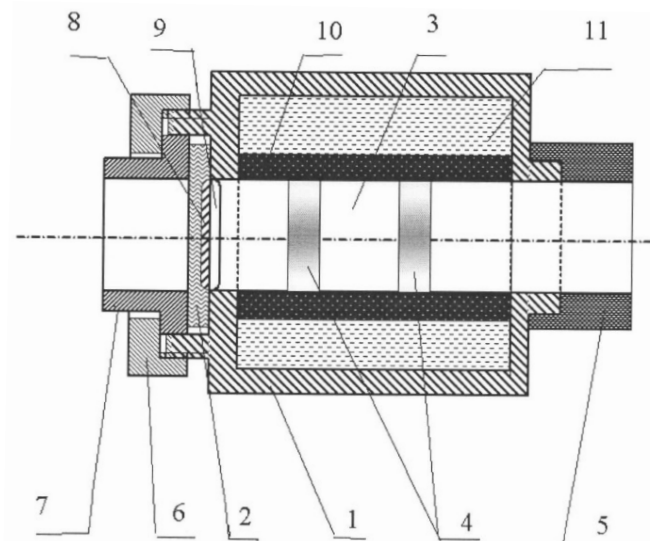


Рис. 3. Устройство для измерения давления и температуры на волоконно-оптическом датчике: 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – световод; 4 – брэгговская решетка; 5 – приемно-передаточный кабель; 6 – накидная гайка; 7 – напорное устройство; 8 – структура с поверхностным рельефом; 9 – выемка; 10 – защитное покрытие; 11 – жидкость или гель

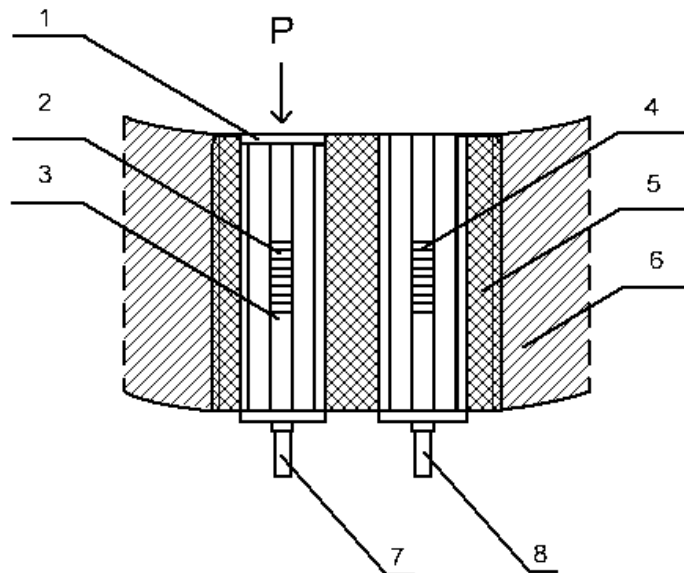


Рис. 4. Датчик динамических давлений: 1 – упругая мембрана; 2 – ВБР1; 3 – сердцевина волоконного световода; 4 – ВБР2; 5 – корпус датчика; 6 – корпус компрессора; 7, 8 – выводы для подключения к интеррогатору

Для того чтобы выходной сигнал давал представление только о давлении воздушных масс, в корпусе датчика расположен еще один волоконный световод с ВБР2, сигнал на выходе которого является эталонным. На ВБР2 воздействует только температура корпуса компрессора. Сигналы со световодов поступают на два входа интеррогатора и на выходе измерительной системы фиксируется разностный сигнал со световодов. Данная структура датчика позволяет измерить давление воздушных масс без погрешности измерения за счет изменения температуры корпуса.

Заключение

Таким образом, использование оптических свойств волокна с брэгговскими решетками на данный момент является одним из наиболее актуальных и перспективных методов измерения давления за счет возможности проводить измерения в тяжелых окружающих условиях и без влияния электрических помех. Именно поэтому датчик с применением волоконных световодов выбран для дальнейшего изучения характера изменения воздушного потока в периферийной области турбомашин.

Библиографический список

1. Данилин, А. И. Бесконтактные измерения деформационных параметров лопаток в системах контроля и управления турбоагрегатами / А. И. Данилин. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2008. – С. 189–198.
2. Патент 2018104931 Российская Федерация. Автоматическое устройство термомеханического управления радиальным зазором между концами рабочих лопаток ротора и статора компрессора или турбины двухконтурного газотурбинного двигателя / Эскин И. Д., Старцев Н. И., Фалалеев С. В. – № 2684073 ; заявл. 08.02.2018 ; опубл. 03.04.2019, Бюл. № 10.
3. Патент 2014154334/28 Российская Федерация. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашин / Белоухов В. Н., Подлипов П. Е., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. – № 2587644 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17.
4. Патент 2016132350 Российская Федерация. Способ измерения радиального зазора между торцами рабочих лопаток и статором газотурбинного двигателя / Боровик С. Ю., Коршиков И. Г., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. – № 2648284 ; заявл. 04.08.2016 ; опубл. 23.03.2018, Бюл. № 9.
5. Патент 2013139738/06 Российская Федерация. Вентилятор или компрессор турбомашин / Бюйль Ф. Ш., Леру А., Турэн Д., Ляннере К., Сарнаго Ф., Бернар С. – № 2585154 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 15.
6. Патент 2015124042 Российская Федерация. Способ измерения расстояния и устройство измерения расстояния / Мюллер А., Полески П., Трич К., Войчек Р.-Д. – № 2691135 ; 19.06.2015 ; опубл. 11.06.2019, Бюл. № 17.
7. Патент 2009127647/28 Российская Федерация. Устройство и способ бесконтактного измерения вибрации лопаток / Цилински М., Циглер Г. – № 2465562 ; заявл. 12.12.2007 ; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 30.
8. Патент 2017117278 Российская Федерация. Способ и устройство мониторинга лопаточного колеса авиационного двигателя посредством измерения положения равновесия / Жере В., Ник Ж. – № 2686654 ; заявл. 15.10.2015 ; опубл. 29.04.2019, Бюл. № 13.
9. Патент 2015108301/28 Российская Федерация. Емкостной инерционный датчик давления, способ его сборки и способ измерения давления / Казарян А. А. – № 2589494 ; заявл. 11.03.2015 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19.

10. Патент 2012125667/28 Российская Федерация. Волоконно-оптический торцевой датчик давления (его варианты) / Симонов М. А., Дельнов С. В., Заренбин А. В. – № 2522791 ; заявл. 20.06.2012 ; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.
11. Патент 2016144114 Российская Федерация. Волоконно-оптический датчик давления / Гафнер В. А., Смирнов И. И. – № 2628734 ; заявл. 09.11.2016 ; опубл. 21.08.2017, Бюл. № 24.
12. Патент 2014122444/28 Российская Федерация. Устройство для измерения давления и температуры в потоке газа и/или жидкости и стенд для испытания и измерения характеристик работы газотурбинного двигателя / Давыдова Л. Н., Еричев Д. Ю., Замышляев А. Н., Самсонов В. М. – № 2567470 ; заявл. 03.06.2014 ; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.

References

1. Danilin A. I. *Beskontaktnye izmereniya deformatsionnykh parametrov lopatok v sistemakh kontrolya i upravleniya turboagregatami* [Non-contact measurements of the deformation parameters of the blades in control systems and control of turbine units]. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2008, pp. 189–198. [In Russian]
2. Patent 2018104931 Russian Federation. *Avtomaticheskoe ustroystvo termomekhanicheskogo upravleniya radial'nyim zazorom mezhdu kotsami rabochikh lopatok rotora i statora kompressora ili turbiny dvukhkoturnogo gazoturbinnogo dvigatelya* [Automatic device for thermomechanical control of the radial clearance between the ends of the rotor blades and the stator of a compressor or a turbine of a double-circuit gas turbine engine]. Eskin I. D., Startsev N. I., Falaleev S. V. No. 2684073; appl. 08.02.2018; publ. 03.04.2019, bull. no. 10. [In Russian]
3. Patent 2014154334/28 Russian Federation. *Sposob izmereniya radial'nykh zazorov mezhdu tortsami lopatok rabocheho koleasa i statornoy obolochkoy turbo-mashiny* [The method of measuring radial clearances between the ends of the impeller vanes and the stator shell of a turbo machine]. Belopukhov V. N., Podlipnov P. E., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. No. 2587644; appl. 30.12.2014; publ. 20.06.2016, bull. no. 17. [In Russian]
4. Patent 2016132350 Russian Federation. *Sposob izmereniya radial'nogo zazora mezhdu tortsami rabochikh lopatok i statorom gazoturbinnogo dvigatelya* [The method of measuring the radial clearance between the ends of the blades and the stator of a gas turbine engine]. Borovik S. Yu., Korshikov I. G., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. No. 2648284; appl. 04.08.2016; publ. 23.03.2018, bull. no. 9. [In Russian]
5. Patent 2013139738/06 Russian Federation. *Ventilyator ili kompressor turbomashiny* [Turbomachine fan or compressor]. Byuyl' F. Sh., Leru A., Turen D., Lyannere K., Sarnago F., Bernar S. No. 2585154; appl. 25.01.2012; publ. 10.03.2015, bull. no. 15. [In Russian]
6. Patent 2015124042 Russian Federation. *Sposob izmereniya rasstoyaniya i ustroystvo izmereniya rasstoyaniya* [The method of measuring distance and a device for measuring distance]. Myuller A., Poleski P., Trich K., Voychek R.-D. No. 2691135; 19.06.2015; publ. 11.06.2019, bull. no. 17. [In Russian]
7. Patent 2009127647/28 Russian Federation. *Ustroystvo i sposob beskontaktnogo izmereniya vibratsii lopatok* [Device and method for non-contact measurement of blade vibration]. Tsilinski M., Tsigler G. No. 2465562; appl. 12.12.2007; publ. 27.01.2011, bull. no. 30. [In Russian]
8. Patent 2017117278 Russian Federation. *Sposob i ustroystvo monitoringa lopatochnogo koleasa aviatsionnogo dvigatelya posredstvom izmereniya polozheniya ravnovesiya* [Method and device for monitoring the blade wheel of an aircraft engine by measuring the equilibrium position]. Zhere V., Nik Zh. No. 2686654; appl. 15.10.2015; publ. 29.04.2019, bull. no. 13. [In Russian]

9. Patent 2015108301/28 Russian Federation. *Emkostnoy inertsiionnyy datchik davleniya, sposob ego sborki i sposob izmereniya davleniya* [Capacitive inertial pressure sensor, method of assembly and method for measuring pressure]. Kazaryan A. A. No. 2589494; appl. 11.03.2015; publ. 10.07.2016, bull. no. 19. [In Russian]
10. Patent 2012125667/28 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy tortsevoy datchik davleniya (ego varianty)* [Fiber optic end pressure sensor (its variants)]. Simonov M. A., Del'nov S. V., Zarenbin A. V. No. 2522791; appl. 20.06.2012; publ. 20.07.2014, bull. no. 20. [In Russian]
11. Patent 2016144114 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy datchik davleniya* [Fiber optic pressure sensor]. Gafner V. A., Smirnov I. I. No. 2628734; appl. 09.11.2016; publ. 21.08.2017, bull. no. 24. [In Russian]
12. Patent 2014122444/28 Russian Federation. *Ustroystvo dlya izmereniya davleniya i temperatury v potoke gaza i/ili zhidkosti i stend dlya ispytaniya i izmereniya kharakteristik raboty gazoturbinnogo dvigatelya* [The device for measuring pressure and temperature in a gas and/or liquid flow and the stand for testing and measuring the performance of a gas turbine engine]. Davydova L. N., Erichev D. Yu., Zamyshlyayev A. N., Samsonov V. M. No. 2567470; appl. 03.06.2014; publ. 10.11.2015, bull. no. 31. [In Russian]

Данилин Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой радиотехники,
Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С. П. Королева (Россия,
г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: aidan@ssau.ru

Danilin Aleksandr Ivanovich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of radio engineering, Samara National
Research University (34, Moskovskoye
highway, Samara, Russia)

Иванова Яна Александровна

аспирант, Самарский
национальный исследовательский
университет имени академика
С. П. Королева (Россия, г. Самара,
ул. Московское шоссе, 34)

E-mail: ivanova.yaa@ssau.ru

Ivanova Yana Aleksandrovna

Postgraduate student, Samara National
Research University (34, Moskovskoye
highway, Samara, Russia)

Образец цитирования:

Данилин, А. И. Методы диагностики динамических давлений газовых потоков в области периферийных зазоров лопаточных колес турбомашин / А. И. Данилин, Я. А. Иванова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 28–35. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-3.

**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЛАБОРАТОРНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ СПЕКТРА И УРОВНЯ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ РАСТЕНИЙ
В ПОМЕЩЕНИЯХ ЗАКРЫТОГО ГРУНТА**

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом разработки является лабораторно-исследовательская система для анализа влияния спектра и уровня светового излучения на тепличные растения в различные фазы их развития. Существующие системы освещения для помещений закрытого грунта чаще всего реализованы на натриевых газоразрядных лампах с нерегулируемым спектром излучаемого света и уровнем освещенности. Целью работы является улучшение энергоэффективности системы освещения и обеспечение регулировки спектральной составляющей светильников для разных фаз развития растений.

Материалы и методы. С целью повышения энергоэффективности системы освещения помещения закрытого грунта измеряется уровень и спектр естественной (солнечной) освещенности, а источник искусственного света повышает до требуемых значений уровень освещенности и спектр излучения.

Результаты. Практическая реализация источников света выполнена на основе RGB-светодиодов. Задание необходимого значения спектра оптического излучения производится программно микропроцессором, а управление уровнем освещенности производится ШИМ-модулированием напряжения источника питания. Система позволяет экспериментально исследовать влияние силы света и спектра источника оптического излучения на развитие сельскохозяйственных растений в помещениях закрытого грунта и определить наилучшие показатели в каждой фазе их развития.

Выводы. Разработанная система позволяет экспериментальным путем определить оптимальные значения освещенности и спектра света на показатели роста и развития растений в помещениях закрытого грунта.

Ключевые слова: автоматизация управления освещенностью, датчик интенсивности и спектрального состава света, микропроцессор, RGB-светодиод, люкс-спектральные характеристики света, энергоэффективность.

V. N. Ashanin, A. A. Mel'nikov, S. E. Larkin, N. A. Aravin

**MICROPROCESSOR LABORATORY RESEARCH SYSTEM
FOR ANALYSIS OF THE SPECTRUM INFLUENCE
AND LEVEL OF THE OPTICAL RADIATION
ON PLANT GROWTH IN INDOOR SOIL**

© Ашанин В. Н., Мельников А. А., Ларкин С. Е., Аравин Н. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The object of development is a laboratory research system for analyzing the influence of the spectrum and the level of light radiation on greenhouse plants in various phases of their development. Existing lighting systems for indoor rooms are most often implemented on sodium gas discharge lamps with an unregulated spectrum of emitted light and the level of illumination. The aim of the work is to improve the energy efficiency of the lighting system and ensure the adjustment of the spectral component of the fixtures for different phases of plant development.

Materials and methods. In order to increase the energy efficiency of the indoor lighting system, the level and spectrum of natural (solar) illumination are measured, and the artificial light source increases the level of illumination and radiation spectrum to the required values.

Results. The practical implementation of the light sources is based on RGB LEDs. The required value of the spectrum of optical radiation is set by the microprocessor software, and the illumination level is controlled by PWM modulation of the voltage of the power source. The system allows you to experimentally study the effect of light intensity and the spectrum of the optical radiation source on the development of agricultural plants in closed ground and determine the best indicators in each phase of their development.

Conclusions. The developed system allows us to experimentally determine the optimal values of illumination and light spectrum for growth and development of plants in indoor areas.

Keywords: lighting control automation, light intensity and spectral sensor, microprocessor, RGB LED, light lux spectral characteristics, energy efficiency.

Введение

Большинство выращиваемых овощных растений родом из Южной Америки и Африки являются теплолюбивыми с длительным вегетативным периодом, поэтому выращивание таких растений на территории России предполагает значительный период их развития в помещениях с закрытым грунтом. Это определяет разработку и освоение энергоэффективных средств выработки тепловой и световой энергий, так как на урожайность тепличных растений существенно влияют температурный режим, уровень освещенности и спектральный состав света [1, 2].

Прежде всего для каждой сельскохозяйственной культуры в течение суток необходима не только разная интенсивность света, но и спектр освещения должен изменяться, моделируя, как правило, естественные условия произрастания в странах происхождения сельскохозяйственной культуры [3, 4]. Однако для создания новых более эффективных световых режимов возможны и отклонения от естественных люкс-спектральных характеристик. Кроме того, эффективный спектральный состав света в течение различных фаз развития растений также претерпевает изменения. Поэтому необходимы исследования влияния параметров освещения на конкретную тепличную культуру.

1. Постановка задачи на проектирование

С точки зрения определения наиболее эффективного оптического излучения для каждой тепличной культуры необходимо выполнение следующих исследований:

– изменение интенсивности и спектрального состава в течение светового дня, продолжительность которого должна быть максимально приближена

к условиям произрастания культуры в стране происхождения. Однако вполне прогнозируемо, что после соответствующих лабораторных исследований возможно более эффективным будет применение новых режимов освещения;

– изменение спектрального состава света в течение всего времени выращивания с целью получения максимальной урожайности, калорийности и насыщенности минералами. Здесь также возможно, после соответствующих практических исследований, создание новых параметров (режимов) спектральных характеристик источников света, обеспечивающих наилучшие параметры выращиваемых культур.

Для реализации вышеуказанных исследований необходима разработка системы, которая позволит провести исследования влияния оптического излучения на отдельные виды тепличных растений с целью получения максимального плодоношения при минимальном сроке созревания.

Поскольку каждый вид растений имеет свои индивидуальные требования к спектральному составу света и эти требования изменяются в зависимости от фазы развития растений, то традиционные источники света, используемые сегодня в теплицах, не могут полностью удовлетворить указанным требованиям. Поэтому разработка энергоэффективных автоматических систем искусственного освещения на светодиодах с регулируемой силой и спектральным составом света является актуальной задачей.

2. Разработка системы

Известно, что влияние спектра оптического излучения на глаз человека и растения различно. На рис. 1 показано различие восприятий солнечного света человеком и растениями.

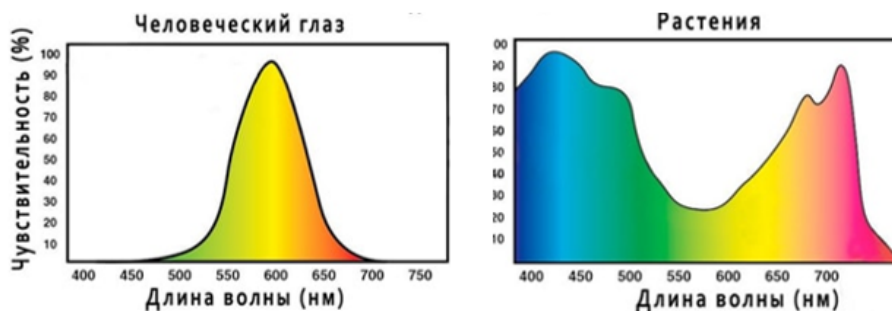


Рис. 1. Восприятие солнечного света человеком и растениями

Растения наиболее восприимчивы к синему, оранжевому и красному диапазонам светового спектра. При воздействии волн этой длины процессы фотосинтеза происходят наиболее интенсивно. Пики восприятия – 445 нм и 660 нм. Зеленую и желтую части спектра растения практически не поглощают [1].

Проведенная сравнительная оценка параметров трех групп рассады томата, выращенных под люминесцентными, натриевыми и светодиодными источниками излучения, соответственно показала, что рассада, выращенная под светодиодным светильником, уступает по всем показателям рассаде, выращенной под люминесцентными и натриевыми лампами [3, 4]. Этот результат можно объяснить тем, что светодиодный светильник, используемый

в эксперименте, не имел регулировки по спектральному составу. Данный недостаток возможно исключить при использовании светильников на RGB-светодиодах [2].

Агротехнические нормы предписывают высокую точность стабилизации температуры (± 1 °C), своевременное ее изменение в зависимости от уровня фотосинтетически активной облученности, фазы развития растений и времени суток. Это предъявляет высокие требования к функционированию и техническому совершенствованию оборудования автоматизации управления микроклиматом в теплицах. Предлагается осуществить автоматизацию управления микроклиматом в лабораторно-исследовательской системе (ЛИС) для анализа влияния спектра излучения, что позволит экономить тепло при росте урожайности, улучшить условия труда персонала и повысить общую культуру производства.

Структурная схема системы приведена на рис. 2.

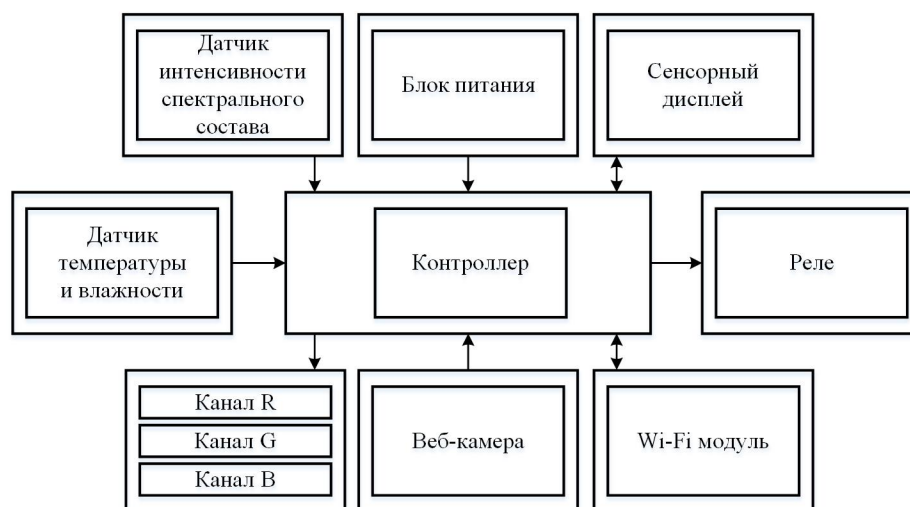


Рис. 2. Структурная схема ЛИС для анализа влияния спектра оптического излучения на различных стадиях роста растений

Разработанная ЛИС состоит из группы RGB-светильников с регулируемым спектральным составом света и уровнем освещенности, контроллера на основе 32-разрядного микропроцессора STM32F103VET, датчика интенсивности и спектрального состава светового потока, датчика влажности и температуры, цветного графического дисплея с сенсорной панелью, IR-интерфейсом для дистанционного управления RGB-светильниками и блока питания. Кроме того, в контроллер заложены функции управления следующими устройствами: веб-камерой, блоком реле, Wi-Fi-модулем (для удаленной связи с телефоном или компьютером). Для учета потребления электроэнергии установлен счетчик.

Блок-схема микропроцессорной системы управления ЛИС представлена на рис. 3.

Основным датчиком, который используется в ЛИС, является датчик интенсивности и спектрального состава света. Он реализован на семи светодиодах, каждый из которых имеет свой поляризатор и пропускает только заданную длину волны (заданную спектральную составляющую).

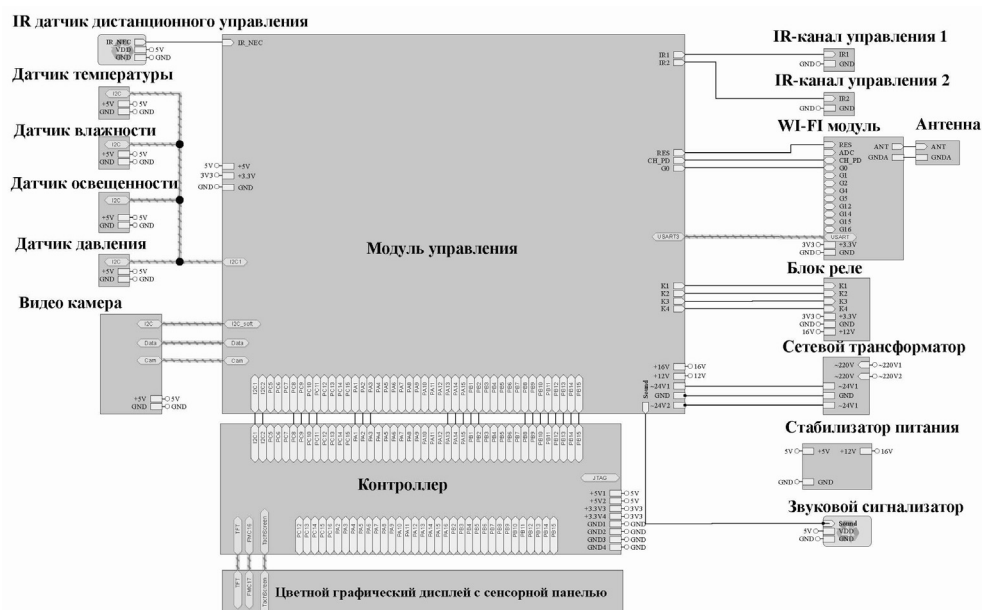


Рис. 3. Блок-схема микропроцессорной системы управления ЛИС

Блок управления смонтирован во влагозащищенном корпусе. Средством ввода и вывода информации управления служит дисплей с сенсорной панелью. Для более точного управления спектральным составом света запрограммирован выбор произрастающей культуры и стадии роста растения. Заложены три режима управления светодиодными RGB-светильниками: ручной режим, автоматический режим и режим досветки. При выборе ручного режима спектральный состав излучаемого света и время работы задается вручную. Режим досветки позволяет продлевать световой день для растений, время включения светильников задается как вручную, так и в автоматическом режиме с помощью датчика интенсивности светового потока. В автоматическом режиме осуществляется дополнение недостающих частей спектрального состава солнечного света в течение всего светового дня.

Предлагаемая конфигурация расположения источников света позволяет проводить исследования одновременно трех групп растений, что сокращает время проведения эксперимента и, тем самым, сокращает расходы на электроэнергию и обслуживание.

Заключение

Итогом исследования является разработка лабораторно-исследовательской системы для анализа влияния спектра и уровня освещенности оптического излучения на рост растений в различных стадиях их развития, конструктивно позволяющая проводить эксперимент одновременно с тремя видами растений. С ее помощью реализована возможность экспериментальным путем определять силу света и спектр светового освещения растений в помещениях закрытого грунта, что поможет сельскохозяйственным производителям существенно экономить энергию и время на производство качественной тепличной продукции.

Практическая реализация ЛИС выполнена на средства гранта, выделенного посольством Германии в России по итогам конкурса «Green campus – green city» – «Зеленый кампус – зеленый город».

Библиографический список

1. **Воскресенская, Н. П.** Фотосинтез и спектральный состав света / Н. П. Воскресенская. – Москва : Наука, 1965. – 311 с.
2. **Анохин, В. С.** Автоматическая система управления спектральным составом света для помещений закрытого грунта / В. С. Анохин, В. Н. Ашанин // Вестник Пензенского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 74–78.
3. **Ракулько, С. А.** Сравнительная оценка параметров рассады томата, выращенной под люминесцентными, натриевыми и светодиодными источниками излучения / С. А. Ракулько, А. С. Таранчук // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики : материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Саранск, 28–29 мая 2015 г.). – Саранск, 2015. – С. 236–241.
4. **Яковлев, А. Н.** Влияние спектральных характеристик источников излучения на растения / А. Н. Яковлев, И. Н. Козырев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/2. – С. 112–116.

References

1. Voskresenskaya N. P. *Fotosintez i spektral'nyy sostav sveta* [Photosynthesis and spectral light composition]. Moscow: Nauka, 1965, 311 p. [In Russian]
2. Anokhin V. S., Ashanin V. N. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Penza State University]. 2016, no. 4, pp. 74–78. [In Russian]
3. Rakul'ko S. A., Taranchuk A. S. *Problemy i perspektivy razvitiya otechestvennoy svetotekhniki, elektrotekhniki i energetiki: materialy XII Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhduнар. uchastiem (g. Saransk, 28–29 maya 2015 g.)* [Issues and prospects for the development of domestic lighting, electrical engineering and energy: proceedings of XII All-Russian scientific and practical conference with international participation (Saransk, May 28-29, 2015)]. Saransk, 2015, pp. 236–241. [In Russian]
4. Yakovlev A. N., Kozыrev I. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika* [University proceedings. Physics]. 2013, vol. 56, no. 7/2, pp. 112–116. [In Russian]

Ашанин Василий Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Ashanin Vasiliy Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of electric power and electrical engineering,
Penza State University (40, Krasnaya
street, Penza, Russia)

Мельников Анатолий Аркадьевич

ведущий инженер, кафедра
электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Mel'nikov Anatoliy Arkad'evich

Leading engineer, sub-department
of electric power and electrical engineering,
Penza State University (40, Krasnaya
street, Penza, Russia)

Ларкин Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики
и электротехники, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Larkin Sergey Evgen'evich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of electric power and electrical
engineering, Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Аравин Никита Андреевич

студент, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Aravin Nikita Andreevich

Student, Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ашанин, В. Н. Микропроцессорная лабораторно-исследовательская система для анализа влияния спектра и уровня оптического излучения на рост растений в помещениях закрытого грунта / В. Н. Ашанин, А. А Мельников, С. Е. Ларкин, Н. А. Аравин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 36–42. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-4.

ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕНИЙ ОТ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ НА СИГНАЛООБРАЗОВАНИЕ РАДИОВОЛНОВЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В ЛЕСУ

Аннотация.

Актуальность и цели. В технике охраны государственных объектов актуальной задачей является обнаружение нарушителей в лесу. Перспективными средствами решения этой задачи являются скрытно устанавливаемые в земле радиоволновые средства обнаружения (РВСО) метрового диапазона волн. Цель данной работы – исследование влияния побочных отражений от стволов деревьев на процесс сигналообразования в РВСО для оценки вероятных искажений сигналов нарушителя в условиях леса.

Материалы и методы. Используются разработанные ранее модели сигналообразования РВСО на основе известных допущений для данного диапазона частот, параметров земли и расстояний.

Результаты. Отражения электромагнитных волн от стволов деревьев вызывают изменения сигнала нарушителя в лесу по сравнению с сигналом нарушителя на открытом пространстве. Моделирование указанных процессов показывает, что: изменение амплитуды сигнала нарушителя в лесу определяется взаимным расположением стволов деревьев относительно друг друга и относительно зон Френеля РВСО; максимальное влияние на амплитуду сигнала нарушителя оказывают деревья, расположенные в пределах первой зоны Френеля; изменение амплитуды сигнала нарушителя максимально при движении нарушителя вблизи ствола дерева и может достигать 10–20 % от его амплитуды на открытом пространстве; амплитуда сигнала нарушителя в лесу больше изменяется при мокрой земле, но находится в пределах ее значения при сухой земле.

Выводы. При размещении РВСО в лесу следует учитывать возможность уменьшения амплитуды сигнала нарушителя. Простейшим способом компенсации ее уменьшения является сокращение расстояния между передатчиком и приемником РВСО.

Ключевые слова: поле рассеяния ствола дерева, поле рассеяния нарушителя, прямой сигнал, сигнал нарушителя.

N. N. Tokarev

THE IMPACT OF REFLECTIONS FROM TREES' TRUNKS ON SIGNAL FORMATION OF RADIO-WAVE DEVICES OF METER RANGE DETECTION IN THE WOODS

Abstract.

Background. In the procedure of security of state facilities, the urgent task is to detect intruders in the wood. The advanced means of solving this problem is buried

radio-wave detectors operating within VHF band. The aim of this work is to study the effect of side reflections at tree trunks on the signal formation in radio-wave detectors to assess the likely distortion of the intruder signals in the wood.

Materials and methods. The article describes previously developed signal generation models of radio-wave detectors based on the well-known assumptions for the specified frequency range, ground parameters and distances.

Results. Reflections of electromagnetic waves from tree trunks cause a change in the intruder's signal in the wood compared with the signal generated by an intruder in the open space. Simulation of these processes shows that: the change in signal amplitude generated by the intruder in the wood is caused by the relative position of the tree trunks relative to each other and relative to the Fresnel zones of radio-wave detectors; maximum effect on the amplitude of the intruder signal is caused by trees located within the first Fresnel zone; the amplitude change of the intruder signal is maximum when the intruder moves near the tree trunk and can reach 10–20 % of its amplitude in open space; the signal amplitude of the intruder in the wood changes more when the ground is wet, but it is within its value when the ground is dry.

Conclusions. When radio-wave detectors are located in the wood, one should consider that signal amplitude generated by an intruder can be reduced. The simplest way to compensate for its reduction is to reduce the distance between the transmitter and receiver of the radio-wave detectors.

Keywords: scattered field of tree trunk, intruder scattering field, direct signal, intruder signal.

Введение

Обнаружение людей и транспортных средств в лесу является актуальной задачей служб, обеспечивающих безопасность особо важных объектов, контроль прилегающих к ним территорий. В последнее время для обнаружения нарушителей в лесу предлагаются скрытно устанавливаемые в земле радиоволновые средства обнаружения (РВСО) метрового диапазона волн [1, 2]. В работе [3] показано, что для этих РВСО помехи в лесу, создаваемые раскачивающимися при ветре кронами деревьев, на порядок ниже сигнала нарушителя и не мешают его обнаружению. Однако есть еще один фактор влияния условий леса на РВСО. Неподвижные стволы деревьев создают стационарное отраженное поле, которое накладывается на первичное поле РВСО и интерферирует с ним. При этом возможно искажение сигнала нарушителя. Данная работа посвящена исследованию влияния побочных отражений от стволов деревьев на процесс сигналообразования в РВСО для оценки вероятных искажений сигналов нарушителя в условиях леса.

1. Используемые соотношения

На рис. 1 приведена схема, поясняющая расположение и взаимосвязь элементов, участвующих в функционировании РВСО в лесу. В начале координат декартовой системы расположен передатчик (ПРД) РВСО. На расстоянии R_0 от него по оси x расположен приемник (ПРМ) РВСО. ПРД и ПРМ имеют симметричные горизонтальные антенны с длиной плеча L_a , ориентированные вдоль оси x , расположенные на глубине d от поверхности земли. Наличие леса на схеме имитируется стволом дерева, расположенным вблизи участка и имеющим координаты x_t , y_t (индексом « t » будем обозначать поля, токи и другие характеристики, относящиеся к стволу дерева). Нарушитель,

пересекающий участок, имеет текущие координаты x_p, y_p (индексом «р» будем обозначать поля, токи и другие характеристики, относящиеся к нарушителю). Стрелками на рисунке обозначены направления распространения электромагнитных волн, участвующих в сигналообразовании.

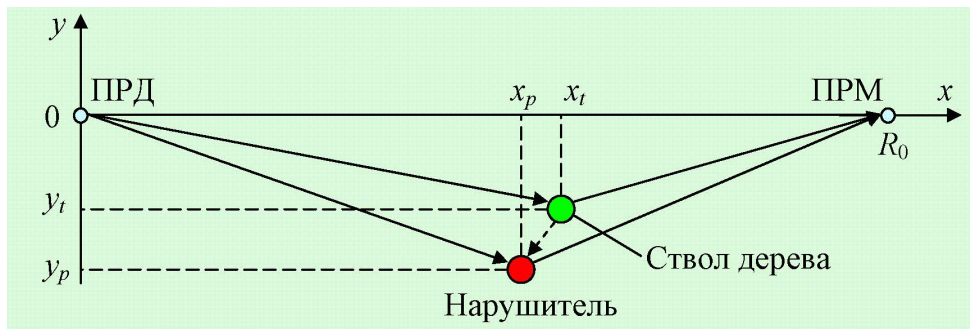


Рис. 1. Схема расположения РВСО

Сначала рассмотрим процессы, происходящие при работе РВСО на открытой местности без деревьев. Эти процессы поясняются схемой, приведенной на рис. 2.

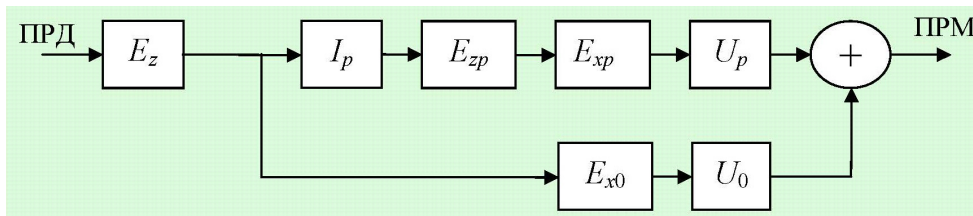


Рис. 2. Схема основных процессов в РВСО на открытой местности

ПРД излучает вертикальную составляющую поля E_z , являющуюся источником основных процессов, отраженных в двух ветвях на схеме. Выражение для вертикальной составляющей первичного поля E_z получено из соответствующего выражения для поля проводной линии [4, 5] при размещении ее в земле [4, 6]:

$$E_z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_2'}} e^{-ik_2 d} I_0 \left[\int_{-L_a}^0 (1 + ik_1 R_1)(x - \xi) \frac{e^{-ik_1 R_1}}{R_1^3} \cdot \frac{\sin k_2 (L_a + \xi)}{\sin k_2 L_a} d\xi + \int_0^{L_a} (1 + ik_1 R_1)(x - \xi) \frac{e^{-ik_1 R_1}}{R_1^3} \cdot \frac{\sin k_2 (L_a - \xi)}{\sin k_2 L_a} d\xi \right], \quad (1)$$

где $R_1 = \sqrt{(x - \xi)^2 + y^2 + z^2}$; ξ – координата вдоль передающей антенны; y и z – соответственно поперечная и вертикальная координаты точки наблюдения; L_a – длина плеча антенны; $k_1 = 2\pi f/c$ – волновое число свободного пространства; f – частота; c – скорость света; $k_2 = k_1 \sqrt{\epsilon_2'}$ – волновое число земли;

$\epsilon'_2 = \epsilon_2 - \frac{i\sigma_2}{2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость земли; ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость земли; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$ (Ф/м) – диэлектрическая постоянная; σ_2 – удельная проводимость земли, синусоидальный член – распределение тока в антенне; I_0 – амплитуда тока в антенне (ниже при расчетах принято $I_0 = 1$ А).

Прямой сигнал РВСО в отсутствие деревьев. Нижняя ветвь на рис. 2 характеризует прямой сигнал РВСО, принимаемый ПРМ в отсутствие нарушителя и леса. Антенна ПРМ принимает продольную составляющую E_{x0} поля, излучаемого ПРД. На поверхности земли ($z = 0$) в месте расположения приемной антенны на расстоянии $x = R_0$ от передающей антенны в соответствии с граничными условиями продольная составляющая напряженности поля E_{x0} примерно в $\sqrt{\epsilon'_2}$ раз меньше вертикальной составляющей и определяется выражением [6]:

$$E_{x0} = \frac{60}{\epsilon'_2} e^{-ik_2 d} I_0 \left[\int_{-L_a}^0 [1 + ik_1(R_0 - \xi)] \frac{e^{-ik_1(R_0 - \xi)}}{(R_0 - \xi)^2} \cdot \frac{\sin k_2(L_a + \xi)}{\sin k_2 L_a} d\xi + \right. \\ \left. + \int_0^{L_a} [1 + ik_1(R_0 - \xi)] \frac{e^{-ik_1(R_0 - \xi)}}{(R_0 - \xi)^2} \cdot \frac{\sin k_2(L_a - \xi)}{\sin k_2 L_a} d\xi \right]. \quad (2)$$

Напряжение прямого сигнала U_0 в приемной антенне определяется интегрированием этой продольной составляющей поля (2) вдоль антенны с учетом прохождения ее через слой земли толщиной d :

$$U_0 = e^{-ik_2 d} \left[\int_{-L_a}^0 E_{x0} \frac{\sin k_2(L_a + \varsigma)}{\sin k_2 L_a} d\varsigma + \int_0^{L_a} E_{x0} \cdot \frac{\sin k_2(L_a - \varsigma)}{\sin k_2 L_a} d\varsigma \right], \quad (3)$$

где ς – продольная координата вдоль приемной антенны.

Сигнал нарушителя в отсутствие деревьев. Верхняя ветвь на рис. 2 показывает формирование сигнала, отраженного от нарушителя. Нарушитель имеет вертикальную ориентацию основных размеров и моделируется вертикальным вибратором соответствующей высоты. Ниже под термином «нарушитель» будем понимать моделирующий его вибратор. Вертикальная составляющая поля, излучаемого антенной ПРД, E_z наводит в вибраторе ток I_p , распределение которого по высоте примем синусоидальным с нулем в верхней части:

$$I_p(\chi) = \frac{E_z(\chi) \cdot h_p}{2W_p} \sin k_1(H_p - \chi), \quad (4)$$

где χ – координата по высоте вертикального вибратора-объекта; H_p – высота

вертикального вибратора-объекта; $W_p = 60 \ln \left(\frac{H_p}{b_p} + \sqrt{\frac{H_p^2}{b_p^2}} \right)$ – волновое со-

противление вертикального вибратора в форме перевернутого конуса [7, 8], моделирующего объект (нарушителя); b_p – радиус основания конуса, рассчитанный исходя из равенства его объема объему моделируемого объекта [8];

$$h_p = \int_0^{H_p} \sin k_1 (H_p - z) dz = \frac{1}{k_1} (1 - \cos k_1 H_p) - \text{действующая высота вертикаль-}$$

ного вибратора-объекта при синусоидальном распределении тока.

Для нахождения вертикальной составляющей поля рассеяния вибратора E_{zp} используется метод вектора Герца:

$$E_{zp} = k_1^2 \Pi_{zp},$$

где Π_{zp} – вектор Герца поля вертикального вибратора, являющегося моделью рассеивающего объекта [4]:

$$\Pi_{zp} = \frac{-i30}{k_1} \int_0^{H_p} \left[\frac{e^{-ik_1 R_2}}{R_2} + \frac{e^{-ik_1 R_3}}{R_3} + 2i \frac{k_1^2}{k_2} Ei(-ik_1 R_3) \right] I_p(\chi) d\chi,$$

$$R_2 = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z - \chi)^2},$$

$$R_3 = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z + \chi)^2},$$

здесь $Ei(\chi)$ – интегральная показательная функция от аргумента χ .

При больших значениях аргумента: $Ei(-ik_1 R_3) \approx \frac{e^{-ik_1 R_3}}{-ik_1 R_3}$, тогда

$$E_{zp} = -i30k_1 \int_0^{H_p} \left[\frac{e^{-ik_1 R_2}}{R_2} + \left(1 - 2 \frac{k_1}{k_2}\right) \frac{e^{-ik_1 R_3}}{R_3} \right] I_p(\chi) d\chi. \quad (5)$$

На поверхности земли ($z = 0$) $R_2 = R_3 = R_4$; продольная составляющая поля рассеяния вибратора – модели нарушителя – определяется выражением [6]:

$$E_{xp} = \frac{-i60k_1}{\sqrt{\epsilon'_2}} \cos \varphi \int_0^{H_p} \left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) \frac{e^{-ik_1 R_4}}{R_4} I_p(\chi) d\chi, \quad (6)$$

где $R_4 = \sqrt{(R_0 - x_p)^2 + y_p^2 + \chi^2}$; $\cos \varphi = \frac{R_0 - x_p}{\sqrt{(R_0 - x_p)^2 + y_p^2}}$; φ – угол между

продольной и радиальной составляющими поля рассеяния объекта на поверхности земли.

Напряжение сигнала U_p в приемной антенне, обусловленное полем рассеяния объекта-нарушителя, определяется аналогично (3) интегрированием продольной составляющей поля (6) вдоль антенны с учетом прохождения ее через слой земли толщиной d :

$$U_p = e^{-ik_2 d} \left[\int_{-L_a}^0 E_{xp} \frac{\sin k_2 (L_a + \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta + \int_0^{L_a} E_{xp} \frac{\sin k_2 (L_a - \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta \right]. \quad (7)$$

Все приведенные выражения содержат зависимость от координат нарушителя x_p, y_p . Сигнал нарушителя представляет собой относительное приращение прямого сигнала при появлении нарушителя и выражается формулой

$$S_p = \frac{|U_0 + U_p|}{|U_0|} - 1. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим процессы, происходящие при работе РВСО в лесу. Эти процессы поясняются схемой, приведенной на рис. 3. Эта схема отличается от приведенной на рис. 2 наличием дополнительной ветви, добавляющей к вертикальной составляющей напряженности поля ПРД E_z вертикальную составляющую поля рассеяния стволов деревьев E_{zt} .

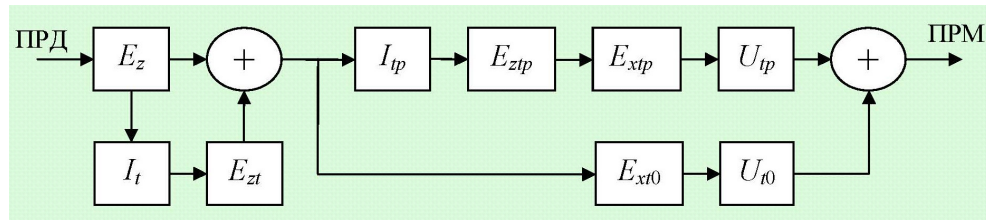


Рис. 3. Схема основных процессов в РВСО в лесу

Поле рассеяния ствола дерева. Ствол дерева имеет вертикальную ориентацию основных размеров и, как и нарушитель, моделируется вертикальным вибратором соответствующей высоты. Ниже под термином «ствол дерева» будем понимать моделирующий его вибратор. Для токов и полей вибратора-модели ствола дерева будем использовать те же формулы, что и для токов и полей вибратора-модели нарушителя.

Вертикальная составляющая поля, излучаемого антенной ПРД, E_z наводит в вибраторе ток:

$$I_t(\chi) = \frac{E_z(\chi) \cdot h_t}{2W_t} \sin k_1 (H_t - \chi), \quad (9)$$

где

$$h_t = \int_0^{H_t} \sin k_1 (H_t - z) dz = \frac{1}{k_1} (1 - \cos k_1 H_t), \quad W_t = 60 \ln \left(\frac{H_t}{b_t} + \sqrt{\frac{H_t^2}{b_t^2} + 1} \right),$$

H_t, W_t, b_t, h_t – параметры вертикального вибратора-модели ствола дерева, аналогичные параметрам вертикального вибратора-модели нарушителя:

$$E_{zt} = -i30k_1 \int_0^{H_t} \left[\frac{e^{-ik_1 R_5}}{R_5} + \left(1 - 2 \frac{k_1}{k_2} \right) \frac{e^{-ik_1 R_6}}{R_6} \right] I_t(\chi) d\chi, \quad (10)$$

где

$$R_5 = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + (z - \chi)^2},$$

$$R_6 = \sqrt{(x - x_t)^2 + (y - y_t)^2 + (z + \chi)^2}.$$

Суммарное поле, формирующее прямой сигнал и сигнал нарушителя РВСО в лесу, складывается из первичного поля ПРД E_z (1) и полей рассеяния стволов деревьев E_{zt} (10).

Прямой сигнал РВСО в лесу. Нижняя ветвь на рис. 3 характеризует прямой сигнал РВСО, принимаемый ПРМ в отсутствие нарушителя. Продольная составляющая суммарного поля на поверхности земли над антенной ПРМ определяется выражением

$$E_{xt0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_2}} \left(E_z + \frac{x - x_t}{\sqrt{(x - x_t)^2 + y_t^2}} E_{zt} \right). \quad (11)$$

В этом выражении E_{zt} и E_{xt0} являются функциями координат дерева x_t и y_t . Для множества деревьев рассеянные ими поля E_{zt} в выражении (11) суммируются с учетом их координат. Напряжение прямого сигнала в антенне ПРМ определяется интегрированием (11) по длине антенны с учетом прохождения его через слой земли толщиной d :

$$U_{t0} = e^{-ik_2 d} \left[\int_{-L_a}^0 E_{xt0} \frac{\sin k_2 (L_a + \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta + \int_0^{L_a} E_{xt0} \frac{\sin k_2 (L_a - \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta \right]. \quad (12)$$

Сигнал нарушителя в лесу. Верхняя ветвь на рис. 3 показывает формирование сигнала нарушителя в присутствии деревьев. В этом случае ток в модели нарушителя формируется суммарным полем $E_z + E_{zt}$:

$$I_{tp}(\chi) = \frac{[E_z(\chi) + E_{zt}(\chi)] \cdot h_p}{2W_p} \sin k_1 (H_p - \chi). \quad (13)$$

Здесь E_{zt} и I_{tp} зависят как от координат нарушителя x_p, y_p , так и от координат дерева x_t, y_t . Для множества деревьев рассеянные ими поля E_{zt} в выражении (13) суммируются с учетом их координат.

Остальные компоненты E_{ztp}, E_{xtp} и U_{tp} определяются аналогично случаю с отсутствием деревьев при замене I_p на I_{tp} :

$$E_{ztp} = -i30k_1 \int_0^H \left[\frac{e^{-ik_1 R_2}}{R_2} + \left(1 - 2 \frac{k_1}{k_2} \right) \frac{e^{-ik_1 R_3}}{R_3} \right] \cdot I_{tp}(\chi) d\chi, \quad (14)$$

$$E_{xtp} = \frac{-i60k_1}{\sqrt{\epsilon_2}} \cos \phi \int_0^H \left(1 - \frac{k_1}{k_2} \right) \frac{e^{-ik_1 R_4}}{R_4} I_{tp}(\chi) d\chi, \quad (15)$$

$$U_{tp} = e^{-ik_2 d} \left[\int_{-L_a}^0 E_{xtp} \frac{\sin k_2 (L_a + \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta + \int_0^{L_a} E_{xtp} \cdot \frac{\sin k_2 (L_a - \zeta)}{\sin k_2 L_a} d\zeta \right], \quad (16)$$

$$S_{tp} = \frac{|U_{t0} + U_{tp}|}{|U_{t0}|} - 1. \quad (17)$$

Влияние стволов деревьев в лесу на сигнал нарушителя заключается в изменении первичного поля за счет отражений от стволов деревьев и изменении вторичного поля, переизлученного нарушителем, за счет изменения первичного поля.

2. Влияние стволов деревьев на структуру поля в лесу

Пользуясь выражениями для составляющих полей, излучаемого ПРД и рассеиваемых стволами деревьев, можно оценить влияние деревьев на структуру поля РВСО в лесу.

Одиночное дерево. Рассмотрим это влияние сначала на примере одного дерева. На рис. 4 показана часть поверхности (вид сверху и сбоку), изображающая суммарную структуру вертикальных составляющих первичного поля ПРД и поля рассеяния ствола дерева на высоте $z = 1$ м в координатах (x, y) :

$$E_{z\Sigma} = |E_z(x, y, 1) + E_{zt}(x, y, 1, 5, 2)|.$$

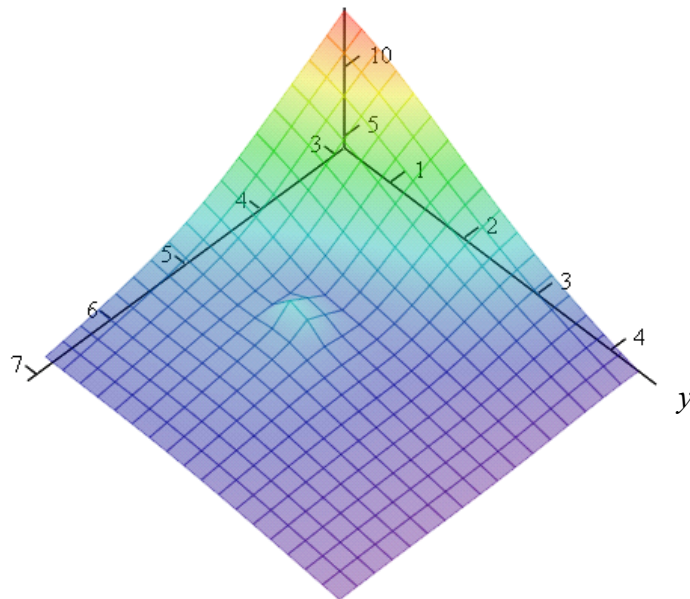


Рис. 4. Структура поля при наличии дерева

Частота зондирующего сигнала 50 МГц. Высота дерева 15 м, диаметр ствола 30 см. Расстояние между ПРД и ПРМ $R_0 = 25$ м, глубина расположения

антенн $d = 15$ см, длина плеча антенны $L_a = 1$ м, амплитуда тока в антенне 1 А. В последующих расчетах, если это не оговорено, используются эти исходные данные. Координаты ствола дерева: $x_i = 5$ м, $y_i = 2$ м. В месте нахождения дерева имеется локальный подъем напряженности поля. Более детальные изменения первичного поля при наличии дерева показаны на рис. 5 сечениями фигуры, приведенной на рис. 4, вертикальными плоскостями $x = 5,5$ м (а) и $y = 2,5$ м (б). На рис. 4 штриховыми линиями показаны пространственные зависимости исходного поля в отсутствие дерева и сплошными линиями – зависимости суммарного поля при наличии отражения от ствола дерева.

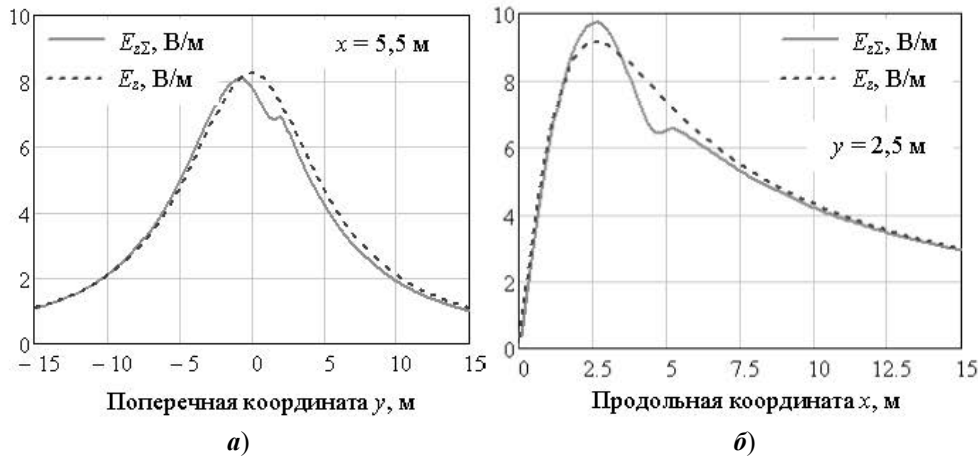


Рис. 5. Изменение структуры поля в поперечном (а) и продольном (б) направлениях

В месте нахождения ствола дерева имеются изменения поля на расстоянии нескольких метров, небольшие и более плавные в сторону уменьшения поля и более резкие в сторону его увеличения.

Группа деревьев. Рассмотрим теперь, как суммируются изменения поля при расположении нескольких деревьев в ряд по продольной и поперечной координатам. На рис. 6 приведены продольные (а) и поперечные (б) зависимости напряженности первичного поля (пунктирные линии) и суммарного поля (сплошные линии).

На рис. 6,а суммарное поле рассчитано при расположении четырех деревьев в ряд вдоль оси рубежа x на расстоянии $y_i = 2$ м от нее и с интервалами 3 м друг от друга ($x_i = 3, 6, 9$ и 12 м). Как видно из сравнения кривых исходного и суммарного полей, влияние деревьев проявляется в некотором спаде уровня поля на участке около 2 м от каждого ствола в сторону увеличения поля.

На рис. 6,б суммарное поле рассчитано при расположении пяти деревьев в ряд поперек рубежа вдоль координаты y на расстоянии $x_i = 12$ м от ПРД и с интервалами 3 м друг от друга ($y_i = -6, -3, 0, 3$ и 6 м). Здесь во всех интервалах между стволами наблюдается существенное снижение уровня поля. При симметричном относительно оси рубежа расположении деревьев изменение поля также симметрично.

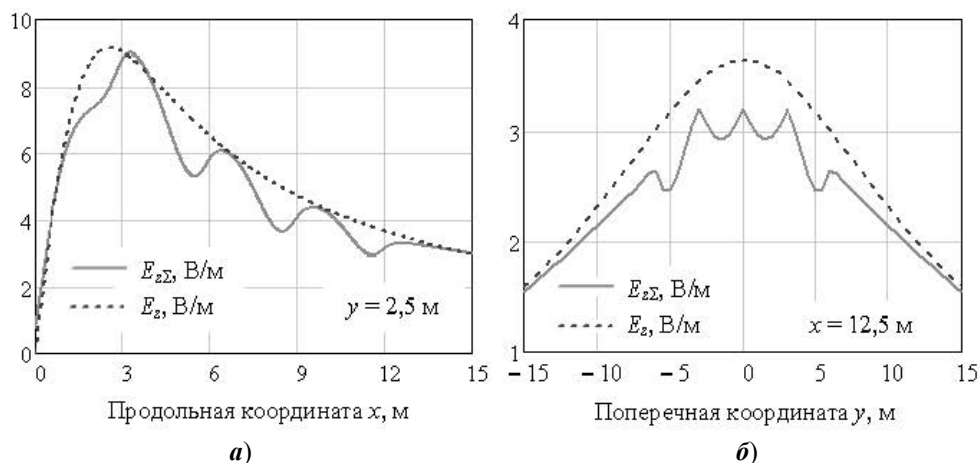


Рис. 6. Изменение структуры поля в поперечном (а) и продольном (б) направлениях при наличии группы деревьев

3. Влияние стволов деревьев на сигнал нарушителя

Влияние стволов деревьев на сигнал нарушителя рассмотрим сначала на примере одного дерева.

Одинокое дерево. Рассмотрим влияние дерева при расположении его на линии рубежа (на условной линии, соединяющей ПРД и ПРМ) и в стороне от нее. На рис. 7 приведены сигналы нарушителя для $y_t = 0$ м при расположении дерева на оси рубежа (а) и для $y_t = 2$ м при расположении дерева на расстоянии 2 м от оси рубежа (б). В обоих случаях продольная координата деревьев $x_t = 12$ м, а место пересечения рубежа $x_p = 12,5$ м. Пунктирными линиями для сравнения показаны сигналы нарушителя на открытой местности без деревьев.

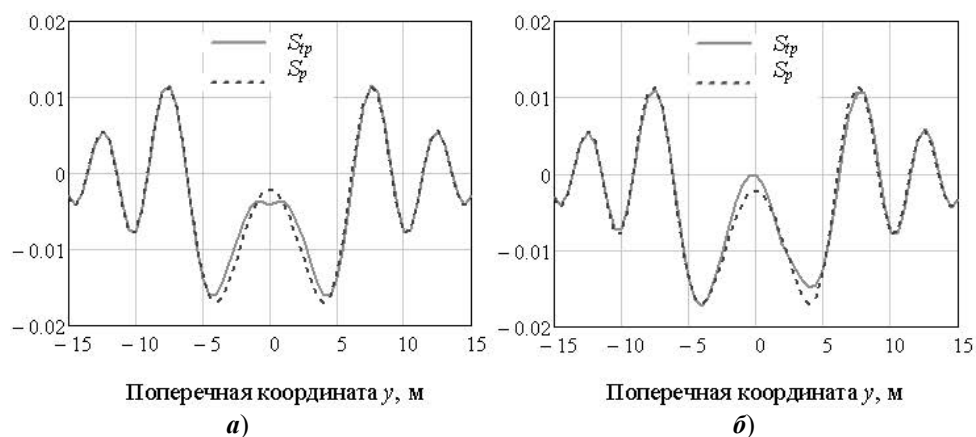


Рис. 7. Сигналы нарушителя при расположении дерева на оси рубежа (а) и в стороне от нее (б)

Как видно из представленных графиков, влияние дерева проявляется на расстоянии примерно 4 м от него в каждую сторону. При этом влияние на сигнал нарушителя дерева, находящегося на оси рубежа, симметрично отно-

сительно этой оси, а влияние дерева, находящегося на расстоянии от оси рубежа, проявляется на той стороне, где расположено дерево.

Влияние группы деревьев на сигнал нарушителя рассмотрим на приведенных выше примерах, когда деревья располагаются на рубеже охраны в ряд по продольной и по поперечной координатам.

Расположение деревьев вдоль рубежа. В первом случае, для которого изменение поля показано на рис. 6,а, рассмотрим сигнал нарушителя, пересекающего рубеж охраны в месте впадины поля с координатой $x = 8,5$ м. Это место находится в 0,5 м от ближайшего вибратора, имитирующего ствол дерева, находящегося в точке с координатами $x_t = 9$ м, $y_t = 2$ м.

Результаты расчета сигналов нарушителя S_{ip} приведены на рис. 8 для сухой (а) и для мокрой (б) земли. При мокрой земле амплитуда сигналов нарушителя примерно в полтора раза выше, чем при сухой. Для сравнения приведены расчеты сигналов нарушителя S_p на открытой местности в отсутствие деревьев. Как видно на рисунке, амплитуда колебаний сигналов нарушителя уменьшилась со стороны расположения деревьев ($y > 0$ м) по сравнению с сигналами в отсутствие деревьев. Особенно существенно изменение амплитуды сигнала нарушителя при мокрой земле. Увеличение влияния деревьев при мокрой земле объясняется так же, как и увеличение сигнала нарушителя, возрастанием в первичном поле доли вертикальной составляющей, являющейся источником поля рассеяния вертикальных объектов [6].

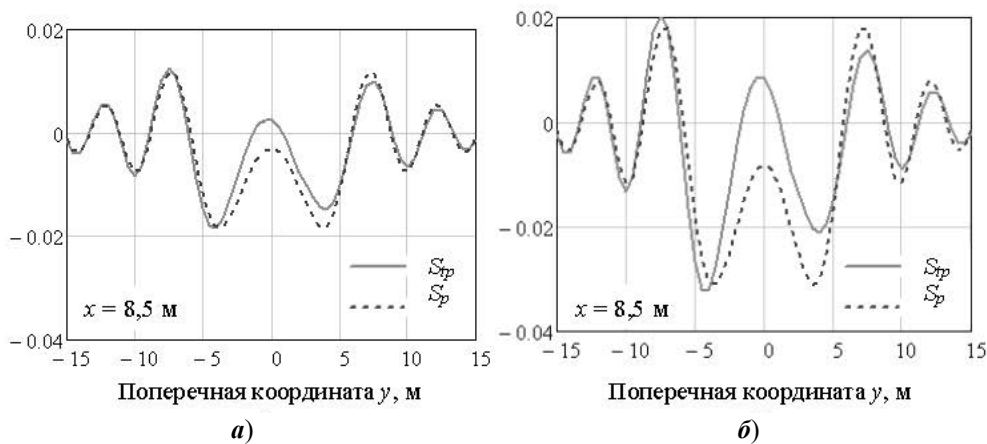


Рис. 8. Сигналы нарушителя при продольном расположении деревьев для сухой (а) и мокрой (б) земли

Расположение деревьев поперек рубежа. Во втором случае, для которого изменение поля показано на рис. 6,б, нарушитель, пересекающий рубеж, движется в поперечном направлении и проходит последовательно вблизи всех деревьев на расстоянии 0,5 м от них ($x = 12,5$ м), пересекая места снижения поля.

Результаты расчета сигналов нарушителя S_{ip} приведены на рис. 9 также для сухой (а) и для мокрой (б) земли. Для сравнения также приведены расчеты сигналов нарушителя S_p на открытой местности в отсутствие деревьев. Поскольку деревья расположены симметрично относительно оси рубежа, то и изменения сигналов нарушителя по отношению к сигналам в отсутствие де-

ревьев также симметричны относительно оси $y = 0$ м. Кроме того, эти изменения меньше, чем в предыдущем случае.

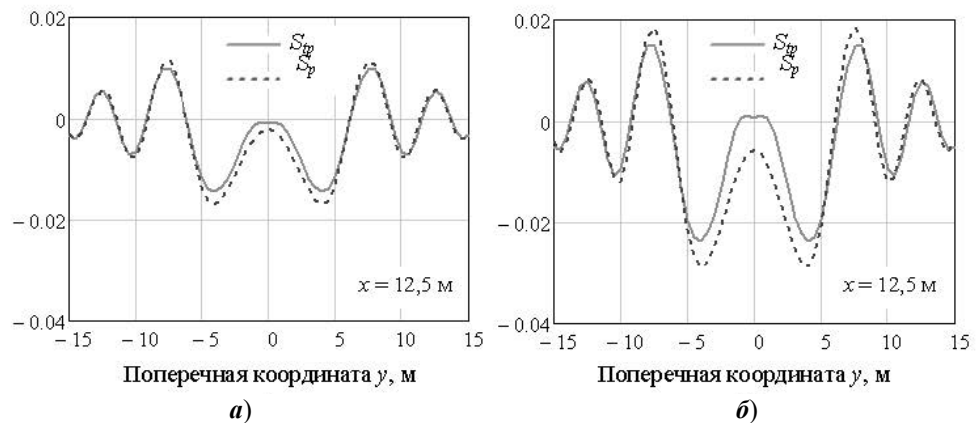


Рис. 9. Сигналы нарушителя при поперечном расположении деревьев для сухой (а) и мокрой (б) земли

Чтобы объяснить, почему эти изменения меньше предыдущих, рассмотрим случай, когда одиночное дерево находится в месте нахождения первого минимума сигнала нарушителя (при $y \approx 4$ м, см. рис. 8) и оценим изменения амплитуды сигнала нарушителя в этом месте при удалении дерева от него. Результаты расчетов при сухой и мокрой земле приведены на рис. 10.

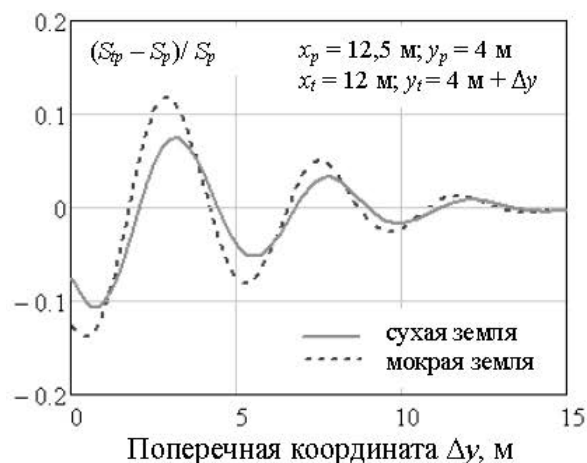


Рис. 10. Относительные приращения амплитуды сигнала нарушителя при удалении местоположения дерева поперек рубежа

Как видно из рис. 10, изменение приращений амплитуды сигнала нарушителя при удалении ствола дерева имеет затухающий колебательный характер с полупериодом колебаний около 2,5 м. Вспомним, что при поперечном расположении деревьев (рис. 6,б) интервал между деревьями составлял 3 м, близкий к указанному полупериоду колебаний. При расчетах сигнала нарушителя для этого случая (рис. 9,б) влияния соседних деревьев частично компенсируются, поскольку имеют разный знак.

Период колебаний относительных приращений амплитуды сигнала нарушителя уменьшается с увеличением расстояния между нарушителем и стволом дерева в соответствии с периодичностью зон Френеля. Амплитуда этих приращений тоже уменьшается с увеличением расстояния между нарушителем и стволом дерева.

Очевидно, влияние двух и более деревьев на сигнал нарушителя будет максимальным, если они находятся в однополярных зонах Френеля. Этот случай соответствует сигналам нарушителя, изображенным на рис. 8, когда деревья расположены вдоль рубежа на расстоянии 2 м от оси, что соответствует первой зоне Френеля. И наоборот, это влияние будет минимальным, если деревья находятся в разнополярных зонах Френеля.

Во всех предыдущих примерах траектория пересечения рубежа нарушителем выбиралась вблизи дерева при продольном расстоянии 0,5 м от него в условиях максимального влияния. Влияние отражений от дерева на сигнал нарушителя уменьшается с увеличением расстояния между ними в поперечном направлении вдоль координаты y (см. рис. 10). Зависимость изменения приращений сигнала нарушителя с увеличением расстояния между нарушителем и стволом дерева в продольном направлении вдоль координаты x показывает рис. 11.

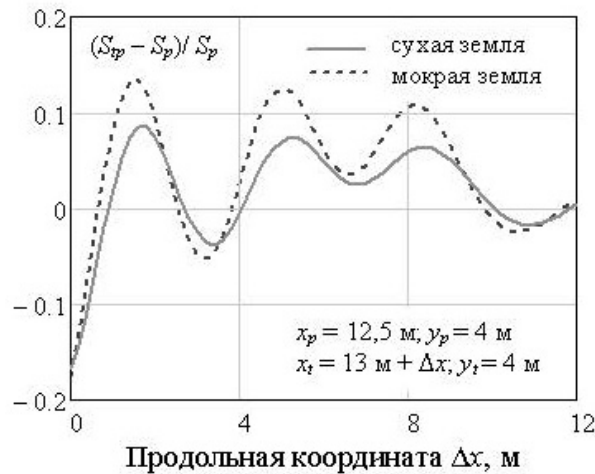


Рис. 11. Относительные приращения амплитуды сигнала нарушителя при удалении местоположения дерева вдоль рубежа

На рис. 11 показан случай, когда нарушитель находится в месте минимума сигнала (в месте отсчета амплитуды сигнала, в точке $x_p = 12,5$ м; $y_p = 4$ м по рис. 9,б), а ствол дерева удаляется от него вдоль координаты x , начиная от точки с координатами $x_t = 13$ м; $y_t = 4$ м. Изменения приращений амплитуды сигнала нарушителя в этом случае также определяются пересечением зон Френеля, но в продольном направлении.

Заключение

Рассмотрено влияние отражений от стволов деревьев на сигналообразование РВСО в лесу, обусловленное влиянием поля рассеяния стволов деревь-

ев на прямой сигнал, принимаемый ПРМ в отсутствие нарушителя, и влиянием поля рассеяния стволов деревьев непосредственно на поле рассеяния нарушителя.

Эти влияния вызывают изменение амплитуды сигнала нарушителя в лесу по сравнению с сигналом нарушителя на открытом пространстве.

Моделирование указанных процессов показывает, что:

- изменение амплитуды сигнала нарушителя в лесу определяется взаимным расположением стволов деревьев относительно друг друга и относительно зон Френеля РВСО;

- максимальное влияние на амплитуду сигнала нарушителя оказывают деревья, расположенные в пределах первой зоны Френеля (5–6 м от оси пробега длиной 25 м);

- изменение амплитуды сигнала нарушителя максимально при движении нарушителя вблизи ствола дерева и может достигать 10–20 % от его амплитуды на открытом пространстве;

- амплитуда сигнала нарушителя в лесу больше изменяется при мокрой земле, но находится в пределах ее значения при сухой земле.

При размещении РВСО в лесу следует учитывать возможность уменьшения амплитуды сигнала нарушителя. Простейшим способом компенсации ее уменьшения является сокращение расстояния между ПРД и ПРМ РВСО.

Библиографический список

1. Средство обнаружения двухпозиционное радиоволновое подземное «БСК-РВП». Паспорт БАЖК.425142.058 ПС. – URL: http://nikiret.ru/upload/iblock/85b/BSK_RVP.-Pasport-v18.pdf.
2. Средство обнаружения многозональное радиоволновое подземное «Рапс-М2». Руководство по эксплуатации. БАЖК.425142.069 РЭ. – URL: http://nikiret.ru/upload/iblock/154/RAPS_M2.-Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-v-11.pdf.
3. Токарев, Н. Н. Помехи радиоволновому средству обнаружения нарушителя в лесу / Н. Н. Токарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 2 (50). – С. 69–87.
4. Лавров, Г. А. Приземные и подземные антенны / Г. А. Лавров, А. С. Князев. – Москва : Сов радио, 1965. – 472 с.
5. Оленин, Ю. А. Анализ поля в линии передачи проводно-волнового средства обнаружения / Ю. А. Оленин, Н. Н. Токарев // Новые промышленные технологии. – 1999. – № 4–5 (291–292). – С. 49–61.
6. Токарев, Н. Н. Моделирование сигнала идущего нарушителя в радиоволновых средствах обнаружения с подземными антеннами / Н. Н. Токарев // Радиотехника. – 2013. – № 2. – С. 98–102.
7. Вэнс, Э. Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели : пер. с англ. / Э. Ф. Вэнс ; под ред. Л. Д. Разумова. – Москва : Радио и связь, 1982. – 120 с.
8. Токарев, Н. Н. Модель сигналообразования в проводно-волновых средствах обнаружения / Н. Н. Токарев // Проблемы объектовой охраны : сб. науч. тр. – Вып. 1. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2000. – С. 93–108.

References

1. *Sredstvo obnaruzheniya dvukhpozitsionnoe radiovolnovoe podzemnoe «BSK-RVP». Passport BAZhK.425142.058 PS* [Underground two-way radio wave detector “BSK-

- RVP". Passport BAZhK.425142.058 PS]. Available at: http://nikiret.ru/upload/iblock/85b/BSK_RVP.-Pasport-v18.pdf. [In Russian]
2. *Sredstvo obnaruzheniya mnogoazonal'noe radiovolnovoe podzemnoe «Raps-M2».* *Rukovodstvo po ekspluatatsii.* BAZhK.425142.069 RE [Detection tool multizonal radio wave underground “Raps-M2”. Manual. BAZhK.425142.069 RE]. Available at: http://nikiret.ru/upload/iblock/154/RAPS_M2.-Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-v-11.pdf. [In Russian]
 3. Tokarev N. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2019, no. 2 (50), pp. 69–87. [In Russian]
 4. Lavrov G. A., Knyazev A. S. *Prizemnye i podzemnye anteny* [Ground and underground antennas]. Moscow: Sov radio, 1965, 472 p. [In Russian]
 5. Olenin Yu. A., Tokarev N. N. *Novye promyshlennye tekhnologii* [New industrial technologies]. 1999, no. 4–5 (291–292), pp. 49–61. [In Russian]
 6. Tokarev N. N. *Radiotekhnika* [Radio engineering]. 2013, no. 2, pp. 98–102. [In Russian]
 7. Vens E. F. *Vliyanie elektromagnitnykh poley na ekranirovannye kabeli: per. s angl.* [The impact of electromagnetic fields on shielded cables: translated from English]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 120 p. [In Russian]
 8. Tokarev N. N. *Problemy ob"ektovoy okhrany: sb. nauch. tr.* [Object security issues]. Issue 1. Penza: Izd-vo PGU, 2000, pp. 93–108. [In Russian]
-

Токарев Николай Николаевич

кандидат технических наук, главный специалист по радиотехническим средствам обнаружения, подразделение № 134, Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники – филиал АО «ФНПЦ «ПО «Старт» имени М. В. Проценко» (Россия, Пензенская область, г. Заречный, пр. Мира, 1, корп. 1)

E-mail: office@nikiret.ru

Tokarev Nikolaj Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, chief specialist for radar facilities, division No.134, Research and Design Institute of Radioelectronic Equipment – branch of Production Enterprise “Start” named after M. V. Protsenko (building 1, 1, Mira avenue, Zarechny, Penza region, Russia)

Образец цитирования:

Токарев, Н. Н. Влияние отражений от стволов деревьев на сигналообразование радиоволновых средств обнаружения метрового диапазона в лесу / Н. Н. Токарев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 43–57. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-5.

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН ОТКАЗОВ ПРОВОЛОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются отказы проволочных резисторов, вызванные различными видами дефектов деталей, узлов, а также применяемых материалов при производстве резистивных датчиков. Предметом исследования являются методы, используемые при анализе изделий и материалов электронной техники. Цель работы – исследование методов анализа деталей, узлов и материалов резистивных датчиков для выработки рекомендаций по внедрению физико-технических методов в производство.

Материалы и методы. Исследование методов анализа деталей, узлов и материалов для выявления различных дефектов выполнялось на основе сопоставления и анализа данных, полученных в процессе контроля технологических процессов.

Результаты. Выявлены основные виды дефектов, встречающихся при производстве проволочных резисторов. Предложена систематизация методов анализа проволочных резисторов, их составных частей и материалов для идентификации того или иного вида дефекта.

Выводы. Анализ возможностей рассмотренных методов при выявлении преобладающих дефектов позволил сформулировать и представить в табличном виде области применимости рассмотренных физико-технических методов для контроля наиболее часто встречающихся дефектов. С учетом области применимости и эффективности использования методов контроля качества и анализа отказов были даны рекомендации по внедрению их в производство.

Ключевые слова: контроль, проволочный резистор, параметр, материал, метод анализа, микроскоп, отказ.

А. Ю. Dorosinskij

APPLICATION OF PHYSICAL AND TECHNICAL METHODS FOR IDENTIFYING WIRE RESISTORS' FAILURES CAUSES

Abstract.

Background. The object of the study is the failure of wire resistors caused by various types of defects in parts, components, and materials used in the production of resistive sensors. The subject of the study is the methods used in the analysis of products and materials of electronic equipment. The purpose of this work is to study methods for analyzing parts, components, and materials of resistive sensors to develop recommendations for implementing physical and technical methods in production.

© Доросинский А. Ю., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. The study of methods for analyzing parts, components and materials to identify various defects was performed on the basis of comparison and analysis of data obtained during the control of technological processes.

Results. The main types of defects encountered in the production of wire resistors are identified. A systematization of methods for analyzing wire resistors, their components and materials for identifying a particular type of defect is proposed.

Conclusions. The analysis of the possibilities of the considered methods in identifying the prevailing defects allowed us to formulate and present in tabular form the areas of applicability of the considered physical and technical methods for the control of the most common defects. Taking into account the scope and effectiveness of the use of quality control and failure analysis methods, recommendations were made for their implementation in production.

Keywords: control, wire resistor, parameter, material, analysis method, microscope, failure.

Введение

Большое разнообразие материалов, используемых в производстве резисторов, определяет необходимость проведения комплексных физико-химических исследований на всех этапах их создания, начиная от выяснения принципиальных возможностей использования новых физических идей и заканчивая непосредственным контролем технологических процессов изготовления резисторов в условиях их массового производства, а также анализа изделий, отказавших в процессе испытаний или эксплуатации.

Необходимость применения физико-технических и физико-химических методов вытекает из определения процесса отказа.

Процессы отказов – необратимые физические и химические реакции в изделиях, которые в совокупности воздействуют на изменение их электрофизических свойств. Реакции, протекающие в резисторах (изделиях), можно разделить на три категории:

- термические реакции физической природы, влияющие на функциональные свойства резистивных элементов, т.е. отказы зависят только от температуры;

- коррозионные реакции, влияющие на электрические характеристики резистивных элементов (воздействие окружающей среды и агрессивных факторов);

- излучающие реакции, которые имеют место при электромагнитной радиации и излучении частиц высокой энергии [1].

Отказы можно разделить с учетом конструкции, причин, их вызвавших.

В источнике [2] вводится следующая градация отказов:

- 1) механические отказы, вызванные всевозможными поломками изделия или его деталей;

- 2) электрические отказы, вызванные использованием изделий при перегрузках;

- 3) физические отказы.

Обобщение результатов анализа дефектных изделий и контроля качества переменных резисторов показало, что основной причиной отказа является нарушение технологического процесса изготовления (рис. 1).

Понимание физики отказов обеспечивается знанием физики материалов, для чего необходимо изучать механизм протекающих в изделиях процессов с учетом физических и механических свойств материалов.



Рис. 1. Причины отказов в процентном представлении

Сталкиваясь с каждым частным случаем отказа, необходимо выбирать подходящий метод анализа, основанный на дедукции, устанавливать причину этого отказа и рекомендовать определенные мероприятия, направленные на предотвращение будущих отказов того же типа. При невозможности установления отказа имеющимися средствами и методами необходимо создать условия для его воспроизведения.

Отсюда является актуальным применение при анализе отказов методов металлографии, электронографии, рентгенографии, люминесцентного и рентгеноспектрального анализов. Чаще всего эти методы дополняют один другой, уточняя причины отказа.

1. Металлографический анализ сварных узлов и соединений

Практика анализа проволочных резисторов показала, что одной из причин отказа является облом выводов и потеря контактирования в шве сварки. Анализ качества сварных соединений, подбор оптимальных режимов сварки с целью предупреждения отказов проводится металлографическим методом.

Для металлографического исследования микроструктуры металлических сварных соединений готовятся шлифы, которые исследуются с применением металлографических микроскопов и микротвердомера.

Шлифы-образцы изучаемого металла должны иметь специально подготовленную поверхность (плоская, шлифованная и полированная). Размеры шлифов, как правило, определяются конфигурацией образцов. Плоскость шлифа перпендикулярна сварному соединению. Для выявления микроструктуры применяют неглубокое травление, в результате глубина растравленного слоя составляет не более 10 мкм. Следы деформации могут вызвать заметные искажения микроструктуры и привести к неправильным результатам исследования. Толщина деформированного слоя уменьшается полировкой механической, химической или электролитической.

В зоне сварки металлы подвергаются термомеханическому воздействию, при котором может существенно изменяться их фазовый состав, структура и степень насыщения дефектами. В этих условиях происходит сложное наложение явлений, важнейшими из которых являются:

- процессы гомогенизации металлов, определяющие их закалку и старение при сварке;
- процессы коагуляции фазовых выделений, определяющие степень разупорядочения сплавов, сваренных в закаленном или состаренном состоянии;
- процессы сегрегации, обусловленные диффузией примесей оплавляемым границам и оказывающие существенное влияние на их прочность;
- процессы роста кристаллов;
- процессы полиморфных превращений, а также связанных с ними превращений твердых растворов;
- процессы старения.

Эти процессы можно наблюдать при анализе шлифов металлографическим и электронномикроскопическим методами. Рассмотрим сварное соединение при анализе отказов или отработке технологии.

На рис. 2 показана качественная сварка вывода постоянных резисторов с колпачком. Монолитное сварное соединение получено без расплавления как одного, так и другого металла. Сварка в данном случае осуществляется за счет рекристаллизации и перекристаллизации нерасплавленных слоев металла. На границе нерасплавленных металлов наблюдаются мелкие кристаллы, направленные перпендикулярно или под острым углом к границе. Металлы в процессе сварки были разогреты до необходимой температуры, что подтверждается наличием участков внедрения одного металла в другой. При сжатии свариваемых металлов разогрев металлов был кратковременным и зерна свариваемых металлов не могли вырасти.

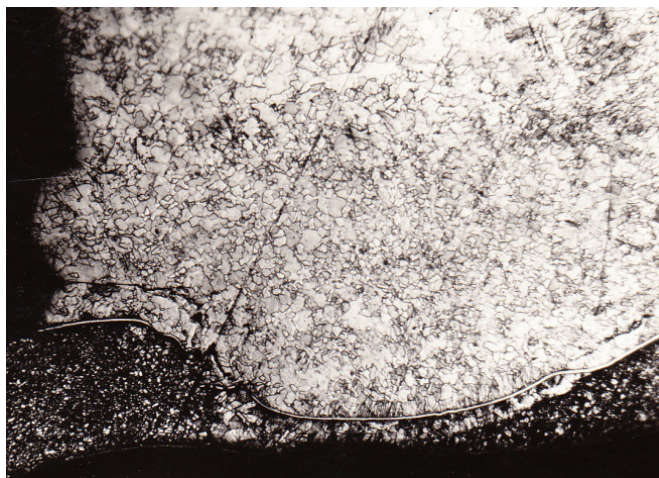


Рис. 2. Сварка вывода с колпачком за счет кристаллизации и перекристаллизации. Увеличение 70^х

При сварке с расплавлением получают монолитное сварное соединение за счет весьма интенсивного процесса перемешивания свариваемых металлов, при котором образуется новый однородный сплав.

По методу анализа сварных соединений разработана методика, позволяющая оценить качество сварных соединений, технологические режимы сварки и провести анализ сварного соединения отказавшего образца.

Кроме анализа сварных соединений, целесообразно выполнять металлографический анализ паяных соединений отказавших резисторов.

На рис. 3 приведена качественная пайка вывода с резистивным элементом: припой смачивает резистивную проволоку, обеспечивая прочный механический и электрический контакты.

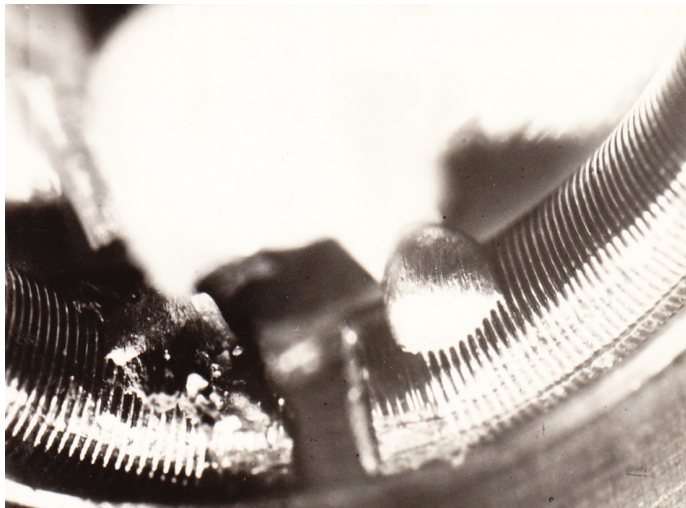


Рис. 3. Качественная пайка вывода с резистивным элементом. $\times 22$

При некачественной пайке наблюдаются поры, ослабляющие механический и электрический контакт с резистивным элементом. При веских нагрузках пайка отстает и приводит к отказу резистора.

2. Определение микротвердости деталей и толщины гальванических покрытий

Измерение микротвердости является одним из наиболее легко и быстро выполняемых видов механических испытаний. Контроль деталей и материалов фактически ведется без разрушения.

С его помощью легко осуществляется контроль эффективности того или иного метода технологической или термической обработки, а также идентичности качества изготавливаемой продукции. Измерение микротвердости основано на методе вдавливания в тщательно подготовленный шлиф анализируемого материала алмазного наконечника. Для измерения микротвердости используются приборы, отличающиеся высокой чувствительностью и требующие высокой точности приложения нагрузки.

Формула, применяемая для расчета микротвердости, содержит три переменных величины:

- нагрузка;
- размер отпечатка;
- геометрия.

На практике нашел широкое применение микротвердомер ПМТ-3. При испытании на микротвердость алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды вдавливается в испытуемый участок образца под

давлением от 0,005 до 0,5 кгс, приложенном в течение определенного времени, и после удаления нагрузки измеряются диагонали квадратного отпечатка, оставшегося на поверхности образца. Число твердости H в кгс/мм² определяется путем деления нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка по следующей формуле

$$H = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2},$$

где P – нагрузка на пирамиду, кгс; α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный $136^\circ \pm 20$; d – среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

При подсчете формула принимает упрощенный вид:

$$H = 1,8544 \frac{P}{d^2}.$$

Для определения микротвердости необходимо подготовить шлиф образца, не допуская его нагрева или наклепа поверхности. Исследуемый образец устанавливается на столик прибора так, чтобы в процессе испытания он не смещался и не прогибался.

Кроме замера микротвердости металлов и сплавов, широко применяется анализ микротвердости органических материалов.

Для увеличения процента выхода годных изделий целесообразно организовать контроль всего поступающего материала для контактных пружин. Данный вид контроля позволит исключить установку в изделия пружины с ослабленными механическими свойствами за счет отклонения от конструкторской документации. Эффект достигается за счет правильного выбора направления волокон в контактных пружинах.

Широкое применение металлографический метод находит при отработке технологии гальванических покрытий, а также контроле гальванических покрытий отказавших образцов. Для определения толщины покрытия делается шлиф анализируемого образца таким образом, чтобы интересующая деталь была строго перпендикулярна его поверхности.

Для того чтобы не допустить закруглений краев образца, шлифовка ведется на алмазной пасте до самых малых ее размеров: 3–5 мкм (полировка не допускается).

Приготовленный таким способом образец протравливается с целью строгого разделения границ материала детали и покрытия, а также снятия заусенцев. Далее ведется замер толщины покрытия по всей поверхности детали. Контроль толщины гальванических покрытий целесообразно выполнять для отработки режимов формирования гальванических покрытий.

3. Количественный металлографический анализ структур материалов

Количество технических сплавов зависит не только от качественных особенностей их микроструктуры, но также от ее количественных характеристик. Металлографические измерения обычно проводятся для получения

данных о микроструктуре, об относительном содержании различных микроструктурных составляющих (т.е. соотношение фаз), определения размера зерен матрицы и т.д. Одна из трудностей количественной металлографии – непрозрачность металла, что приводит к изучению металлов не в трехмерном пространстве, а в двухмерном. Отсюда требуется интерпретация результатов.

Находит применение методика количественного металлографического анализа кристаллических структур, позволяющая определять величину зерен, пор, неметаллических включений, а также фактор формы зерен.

Наибольший интерес при постановке текущих задач представляет определение линейных размеров зерен, пор и включений. Определение размера зерен существенно при отработке режимов термообработки за счет оценки качественных характеристик изделий из одного и того же материала.

4. Электронографический и электронно-микроскопический методы анализа микроструктур

Электронография находит широкое применение при анализе отказавших образцов, при выяснении причин, вызвавших те или иные изменения металлических материалов, применяемых в резисторостроении, при анализе отдельных узлов резисторов. Методами электронографии успешно решаются задачи, связанные с изучением малых количеств вещества [3].

В повседневной практике мы встречаемся с образцами в виде налетов или порошков малого количества. На резистивном элементе в результате технологического процесса образуется налет на токоъемниках и выводах. Существует специально разработанная методика, позволяющая вести анализ всех перечисленных материалов.

Суть данной методики заключается в том, что, определяя радиусы на электронограмме и зная постоянную прибора при каждом определенном напряжении, можно найти по набору межплоскостных расстояний анализируемого материала состав (для большей достоверности анализа необходимо использовать результаты эмиссионной спектроскопии), а затем дать заключение о характере соединения и, соответственно, о природе появившегося вещества. На электронографе, как выше упоминалось, исследования ведутся «на просвет» или «на отражение».

В зависимости от поставленных задач, от вида образца выбирается тот или иной метод. Электронография незаменима при анализе продуктов разрушения резистивных материалов, определении природных частиц в объеме резистора, при изучении механизмов окисления резистивных материалов, совместимости органических материалов с резистивными [3] и т.д.

Также широкое развитие получила электронная микроскопия с помощью которой исследуется морфология микроструктуры, поверхности. Например, дифракционный и микродифракционный анализ отдельных включений позволяют точно идентифицировать детали структуры и по фазовому составу определить их кристаллографическую ориентацию.

Например, электронно-микроскопический метод хорошо зарекомендовал себя при оценке качества гальванических покрытий. Однородная структура с отдельными пузырьками свидетельствует о пористости (рис. 4).



Рис. 4. Микроструктура гальванических покрытий. Разрешение $\times 4500$

С помощью электронной микроскопии также исследуется влияние органических материалов на резистивные и контактирующие материалы, которые в результате деструкции выделяют агрессивные составляющие, изменяющие переходное сопротивление переменных резисторов и снижающие их временную стабильность.

В последнее время электронная микроскопия также находит применение при анализе отказов. На рис. 7 приведена микроструктура окисленной поверхности контактирующей площадки.

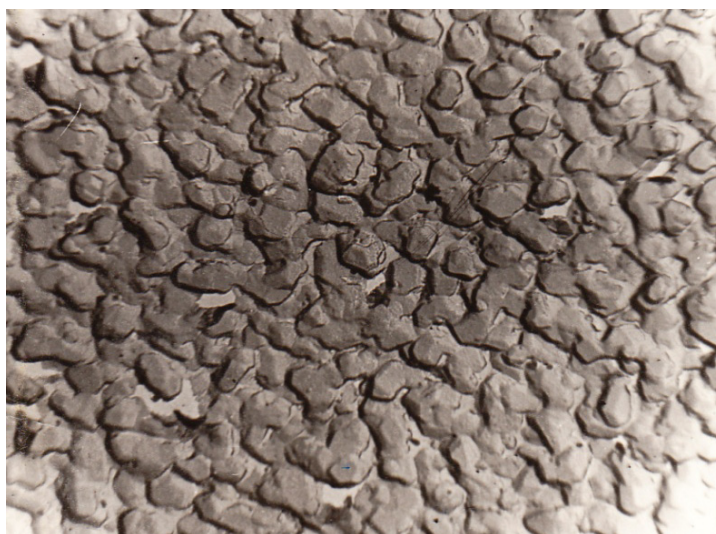


Рис. 5. Микроструктура поверхности алюминиевого контакта. $\times 7000$

Анализируя микроструктуру поверхности, можно с высокой достоверностью судить о качестве того или иного изделия, так как окисление контактирующей площадки впоследствии приводит к отказу.

5. Рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ материалов

Применение рентгеновских дифракционных методов дает возможность исследовать структуру кристаллов, а также проводить качественный и количественный анализ металлов и сплавов, химических соединений, определять постоянные решеток, размеры частиц, макро- и микронапряжения в объеме.

Рентгенограмма многофазной системы представляет собой результат наложения рентгенограммы отдельных фаз, интенсивности линий которых пропорциональны количеству фазы в анализируемой системе. Каждая фаза представлена набором характерных только для нее межплоскостных расстояний.

Для установления фазового состава необходимо из общего ряда выделить ряды, свойственные каждой из фаз в отдельности, затем сопоставить их с табличными значениями для каждой из фаз. При необходимости, проиндицировав соответствующие интерференционные максимумы, можно рассчитать значения периодов решеток.

Весьма эффективно на практике дополнительное исследование внутренних напряжений первого рода:

$$\sigma = \frac{E}{\mu} \cdot \frac{d_{\text{эт}} - d_{\text{обр}}}{d_{\text{эт}}},$$

где $d_{\text{обр}}$ – межплоскостное расстояние исследуемого образца; $d_{\text{эт}}$ – межплоскостное расстояние эталона.

Совокупность данных методов позволяет выбрать оптимальную технологию изготовления проволочного резистивного элемента.

Эффективен и рентгенографический метод при анализе резисторов, отказавших при испытаниях из-за потемнения выводов с целью установления продуктов потемнения [3, 5]. При наличии в налете окислов материала вывода изделия забраковывались и испытания повторялись.

Рентгеноспектральный анализ с помощью электронного зонда позволяет определить химический состав в очень малых объемах образца, поперечные размеры которых на исследуемой поверхности имеют порядок микрона. Такой анализ проводят в специальных устройствах, получивших название микроанализаторов.

6. Люминесцентный анализ инородных частиц на контактирующих поверхностях

Для наблюдения люминесценции малого количества вещества используются специальные ультрафиолетовые микроскопы, позволяющие наблюдать не только люминесценцию компонентов образца, но также и локализацию их в нем.

Широкое применение в лабораторной практике находит ультрафиолетовый микроскоп для анализа инородных частиц на резистивном элементе переменных резисторов, появившихся в процессе производства. Чаще всего это эпоксидные клеи, лаки, крепящие витки резистивной проволоки на каркасе, капроновые стружки и другие инородные материалы, занесенные в процессе их производства. При просмотре резистивных элементов в поле зрения

микроскопа наблюдаются чередующиеся темные и голубовато-зеленоватые или голубовато-сероватые полосы. Темные полосы – витки резистивной проволоки (металл не люминесцирует). Светящиеся полосы соответствуют лаку, крепящему витки намотки. Инородные частицы четко выделяются на этом фоне своим свечением. В табл. 1 приведен цвет свечения частиц материала, которые могут встретиться на контактной дорожке резистивного элемента.

Таблица 1

Свечение различных материалов

Вещество	Цвет люминесценции
1. Лак К-47	Изумрудный
2. Компаундный клей	Голубовато-зеленоватый
3. Канифоль	Голубовато-зеленоватый
4. Глицерин	Голубовато-синеватый
5. Спирт с канифолью	Голубовато-синеватые островки
6. Капроновая стружка	Голубовато-синеватый
7. Гидрозин солянокислый	Голубой
8. Жировые загрязнения, смазки	Голубой

Как видно из табл. 1, большинство применяемых органических материалов люминесцируют в одной и той же области спектра, что в некоторой степени затрудняет идентификацию свечения инородного вещества, нарушающего контактирование резистивного элемента с контактной пружиной.

Для увеличения яркости свечения люминесцирующего вещества используются светофильтры с малой полосой пропускания, что может привести к оптимальному выбору спектра возбуждения. Нарушение контактирования наблюдается как за счет наличия инородных частиц на резистивном элементе, так и на контактной пружине. Идентификация их ведется подобным образом.

Широкое применение люминесцентный анализ находит при отработке технологии крепления витков проволоки резистивного элемента к каркасу резистивного элемента. Проволока должна быть прикреплена лаком к каркасу так, чтобы погружение было не более $2/3$ ее диаметра.

Из-за прозрачности наблюдать лак в оптическом световом микроскопе трудно, поэтому, исходя из свойств металлов не люминесцировать, а органических материалов – люминесцировать, используем ультрафиолетовый микроскоп для наблюдения погружения витков намотки резистивного элемента в лак на контактной дорожке.

Определение погружения ведется по шкале, вмонтированной в окуляр. Точность метода ограничена возможностями человеческого глаза.

Заключение

В рамках данной работы была проведена систематизация методов при выявлении преобладающих дефектов.

В табл. 2 приведены возможности рассмотренных физико-технических методов для контроля различных дефектов.

Данные методы при наличии соответствующего оборудования могут быть использованы на производстве при анализе отказов проволочных резисторов и применяемых в них материалов.

Методы анализа и виды дефектов отказов проволочных резисторов

Преобладающие виды дефектов	Дифрак- ционный		Рентгеноспектральный	Неразру- шающий		Микроскопический					Опреде- ление хим. состава	
	Рентгенографический	Электроннографический		Рентгено-телевизионный	Визуальный	Интерферометрический	Поляриметрический	Металлографический	Электронно- микроскопический	Люминесцентный	Эмиссионный, спектральный	Химический
Дефекты монтажа												
Дефекты паяных и сварных соединений												
Дефекты механических контактных соединений												
Потеря проводимости												
Дефекты защитных покрытий (поры, отслоения, трещины, царапины)												
Механические дефекты резистивных элементов, контактных пружин												
Локализованные инородные включения												
Механические напряжения												
Нарушение химсостава, налеты												
Крепление витков												
Негерметичность												

На основании эффективности применения методов контроля качества и анализа отказов даны рекомендации по внедрению.

Библиографический список

1. **Dodge, H. Stuart** «Physics of failure in spacecraft application 169. Ann. Assurance Sci / H. Dodge. – New York ; London ; Paris, 1969. P. 100–104.
2. **Курносов, А. И.** Исследование причин отказов плоскостных диодов / А. И. Курносов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. – 1965. – № 3.
3. **Дей, И. М.** Исследование влияния органических материалов на окисление контактных сплавов / И. М. Дей // Электронная техника. Сер. «Материалы» в. 1. 1975.
4. **Глезер, А. М.** Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ / А. М. Глезер. – Москва : Техносфера, 2009. – 208 с.

5. Головин, И. С. Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов : учебник / И. С. Головин. – Москва : Изд. Дом МИСиС, 2012 – 247 с.

References

1. Dodge N. Stuart «Physics of failure in spacecraft application 169. Ann. Assurance Sci. New York; London; Paris, 1969, pp. 100–104.
2. Kurnosov A. I. *Voprosy radioelektroniki. Ser. EVT* [Electronics issues. Series]. 1965, no. 3. [In Russian]
3. Dey I. M. *Elektronnaya tekhnika. Ser. «Materialy» v. 1.* [Electronic equipment. Series “Materials” issue 1]. 1975. [In Russian]
4. Glezer A. M. *Skaniruyushchaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyy mikroanaliz* [Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis]. Moscow: Tekhnosfera, 2009, 208 p. [In Russian]
5. Golovin I. S. *Vnutrenneye treniye i mekhanicheskaya spektroskopiya metallicheskih materialov: uchebnik* [Internal friction and mechanical spectroscopy of metallic materials: textbook]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2012, 247 p. [In Russian]

Доросинский Антон Юрьевич

генеральный директор, ООО «Научно-производственное предприятие «Сонар» (Россия, г. Пенза, ул. Центральная, 1Б)

E-mail: antik_r13@mail.ru

Dorosinskiy Anton Yur'evich

General manager, LLC “Research and production enterprise “Sonar” (1B, Centralnaja street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Доросинский, А. Ю. Применение физико-технических методов для выявления причин отказов проволочных резисторов / А. Ю. Доросинский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 58–69. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-6.

«БЫСТРЫЙ» АЛГОРИТМ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Предложен «быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации на основе «прореживания» ряда экстремумов, не использующий декомпозицию на составляющие с одновременным сглаживанием. Показана возможность оценивания параметров временных рядов в скользящем окне и определения параметров мод на участке анализа непосредственно по экстремумам процесса. Целью является сокращение времени анализа больших массивов данных и адаптация метода к режиму реального времени.

Материалы и методы. Исследование проводилось в среде Matlab с использованием экспериментальных данных сейсмической системы обнаружения.

Результаты. Показано, что параметры мод могут быть оценены без использования декомпозиции на основе анализа экстремумов сигнала.

Выводы. Предложенные решения позволяют сократить время анализа быстропеременных процессов, они ориентированы на использование в системах реального времени.

Ключевые слова: быстропеременные процессы, экстремальная фильтрация, экспресс-оценка спектра, моды.

N. V. Myasnikova, M. P. Beresten', A. A. Priymak

A “FAST” EXTREME FILTERING ALGORITHM

Abstract.

Background. A “fast” extreme filtering algorithm based on the “thinning” of a number of extrema is proposed that does not use decomposition into components with simultaneous smoothing. The possibility of estimating the parameters of time series in a sliding window and highlighting the modes in the analysis area directly by the extrema of the process is shown. The goal is to reduce the analysis time of large data sets and adapt the method to real-time mode.

Materials and methods. The study was conducted in a Matlab environment using experimental data from a seismic detection system

Results. It is shown that mode parameters can be estimated without decomposition based on the analysis of signal extremes.

Conclusions. The proposed solutions can reduce the analysis time of rapidly variable processes, oriented to the use of real-time systems.

Keywords: fast-variable processes, extreme filtering, express spectrum estimation, modes.

Введение

Авторы на протяжении многих лет развивают направление цифровой обработки сигналов, связанное с экспресс-анализом сигналов в системах диа-

© Мясникова Н. В., Берестень М. П., Приймак А. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

гностики, обнаружения, распознавания и др. Для этой цели использовался метод экстремальной фильтрации, позволяющий произвести декомпозицию сигнала на знакопеременные составляющие (моды), используя лишь его экстремальные значения. Параметры выделенных составляющих – частоты и амплитуды (или мощности) – могут использоваться как диагностические признаки для обнаружения изменений состояния наблюдаемого объекта, для оценивания спектральных, время-частотных характеристик и др.

Метод экстремальной фильтрации (ЭФ) считается неким аналогом метода декомпозиции на эмпирические моды (EMD). Однако алгоритм экстремальной фильтрации был описан еще в начале 1970-х гг. [1, 2]. Результаты декомпозиции использовались для аппроксимации сигналов и выделения информативных составляющих, а параметры разложения использовались для экспресс-оценки спектра и формирования диагностических признаков.

Аппарат экстремальной фильтрации [3] основан на выделении из ряда x_k , $k = 1, \dots, N$, знакопеременных составляющих, локально определяемых экстремумами процесса $x_{\varepsilon i}$:

$$x_{pi} = -0,25x_{\varepsilon i-1} + 0,5x_{\varepsilon i} - 0,25x_{\varepsilon i+1} \quad (1)$$

при одновременном сглаживании:

$$x_{ci} = 0,25x_{\varepsilon i-1} + 0,5x_{\varepsilon i} + 0,25x_{\varepsilon i+1}. \quad (2)$$

Первое уравнение соответствует режекторному фильтру, удаляющему составляющую известной частоты, а второе – сглаживающему фильтру низких частот. Причем эти преобразования применяются сначала к ряду x_i , а затем к сглаженным составляющим x_{ci} . Совокупность x_{pi} , полученных в результате применения преобразований (1) и (2), представляет собой декомпозицию на знакопеременные составляющие, частота fp каждой составляющей оценивается по количеству экстремумов на интервале или по расстоянию между ними, а по самим экстремумам оценивается амплитуда Ap (или мощность Sp) этой частотной составляющей.

Таким образом, для оценивания амплитудного спектра сигнала $Ap(fp)$ (или спектра мощности $Sp(fp)$) сложной формы необходимо выполнить декомпозицию на моды и оценить параметры составляющих.

Подход к повышению быстродействия

Моды извлекаются из исходного ряда экстремумов $x_{\varepsilon i}$, а уравнение (1) – это нормированное уравнение осциллятора с частотой, определяемой расстоянием между экстремумами. Поэтому, если применить фильтрацию непосредственно к ряду экстремумов, прореживая их, то можно получить экспресс-оценку спектра $Ap(fp)$ на частотах fp , определяемых коэффициентом прореживания k :

$$Ap(k) = \sum_{l=2}^{N_{\varepsilon}/l-2} -\frac{1}{2}x_{\varepsilon}(k \cdot (l-1)) + x_{\varepsilon}(k \cdot l) - \frac{1}{2}x_{\varepsilon}(k \cdot (l+1)),$$

$$fp(k) = \frac{1}{(t_{\varepsilon N} - t_{\varepsilon 1})k}. \quad (3)$$

Здесь k фактически коэффициент прореживания, т.е. так же, как при обычной экстремальной фильтрации, анализ начинается с высокочастотной составляющей. Вначале анализируется последовательность выделенных экстремумов, а затем – каждый второй, третий и т.д.

В качестве примера возьмем сигналы, зарегистрированные в системе сейсмических наблюдений «проезд автомобиля, бег группы, проезд автомобиля».

На экспериментальных данных сейсмической системы обнаружения с использованием датчиков-геофонов, показано, что времячастотные характеристики, полученные по параметрам составляющих, выделенным экстремальным фильтром (по формуле (1), применяемой сначала к исходному ряду, а затем к последовательно получаемым сглаженным составляющим (2)) и на основе предлагаемой экспресс-оценки (3), качественно совпадают, при этом существенно снижается трудоемкость анализа. Последнее качество алгоритма позволяет проводить анализ в режиме реального времени.

На рис. 1 (верхний график) показан сигнал, изменение частот f_{ij} Гц (средний график) и амплитуд A_{ij} в размерных единицах (нижний график) первых трех из j составляющих разложения; по оси абсцисс – номера отсчетов. Совокупность f_{ij} и A_{ij} характеризуют время-частотное распределение. А на рис. 2 представлены тот же сигнал и те же параметры, но полученные на основе «быстрого» алгоритма. «Картина» на рис. 2 и качественно и количественно совпадает с результатами, полученными по алгоритму экстремальной фильтрации (рис. 1), использующему многократное выделение мод.

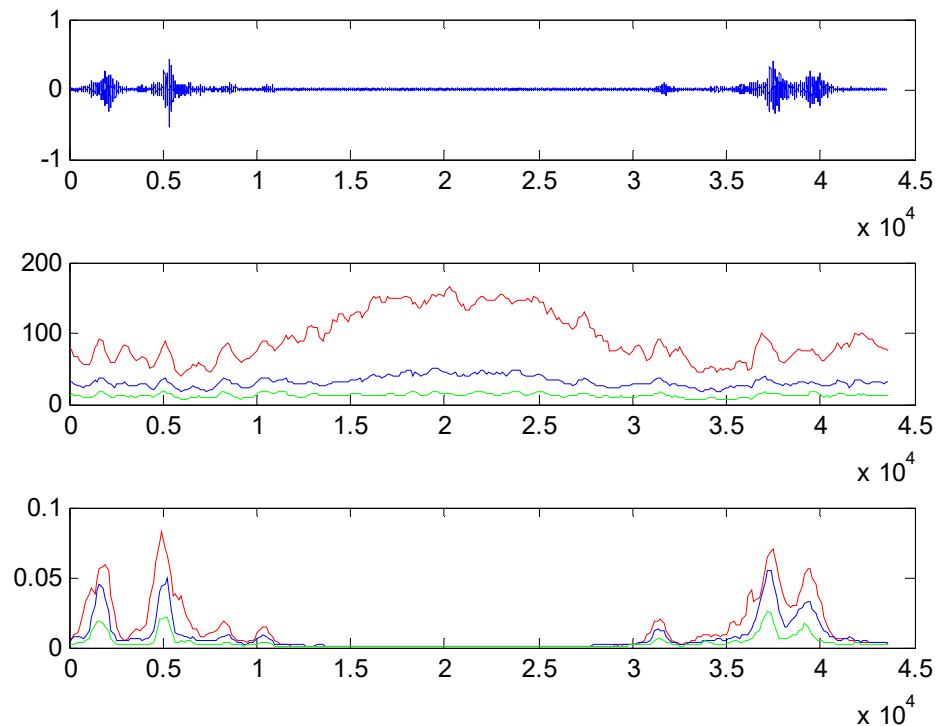


Рис. 1. Изменение параметров, оцениваемых на основе ЭФ, при проезде автомобиля, беге группы, проезде автомобиля

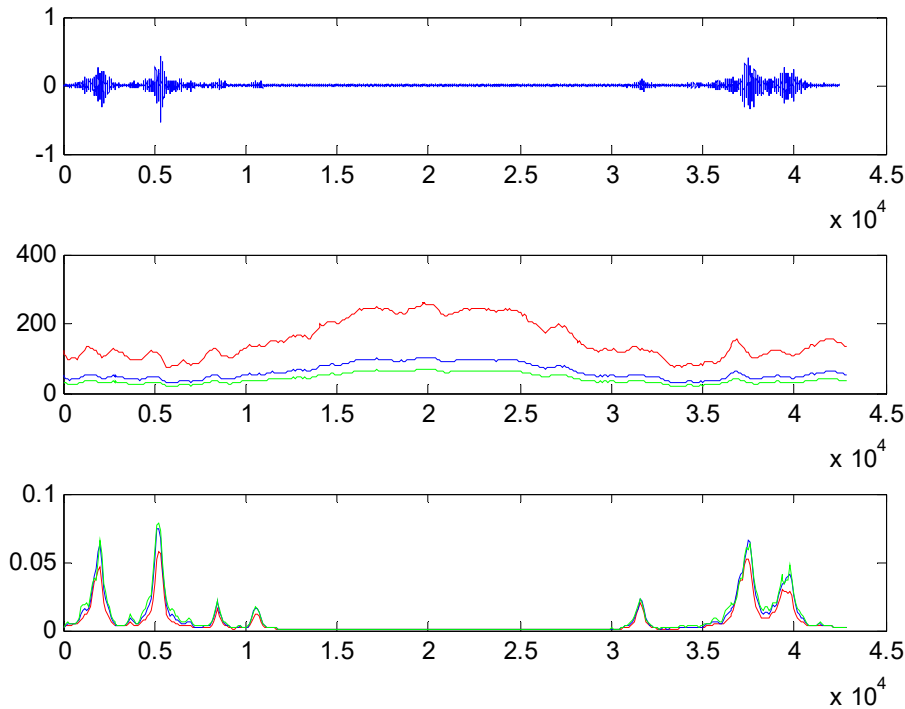


Рис. 2. Изменение параметров, оцениваемых на основе «быстрой» ЭФ

Описанный подход уже использовался в работе [4].

По оценке спектра (3) можно получить оценку значений исходного сигнала в точках экстремумов:

$$x_3(l) = \sum_{k=1}^{N_3} Ap(k) \cdot \cos(2\pi \cdot fp(k) \cdot l), l=1, \dots, N_3.$$

Таким образом, сформирована пара – прямое и обратное «быстрое» преобразование на основе ЭФ.

Однако часто желательно иметь не только оценку текущего спектра, но и «видеть» сами составляющие сигнала. Они будут вычислены по формуле

$$xf_k(l) = -\frac{1}{2}x_3(k \cdot (l-1)) + x_3(k \cdot l) - \frac{1}{2}x_3(k \cdot (l+1)), \quad xt_k = (k \cdot l). \quad (4)$$

Причем не все составляющие xf_k являются модами, а только те, у которых небольшая дисперсия расстояния между экстремумами «прореженного» ряда экстремумов. На рис. 3 показаны результаты декомпозиции сигнала на основе «классической» экстремальной фильтрации по формулам (1) и (2), а на рис. 4 – по формуле (4).

Следовательно, можно оптимизировать алгоритм: сначала вычислить расстояния между экстремумами k -й составляющей; определить дисперсию этого расстояния; при малом значении дисперсии вычислить составляющую по формуле (3).

На рис. 5 показан спектр сигнала трехмодального сигнала, вычисленный по формуле (3). Высокочастотные компоненты вычисляются более точно.

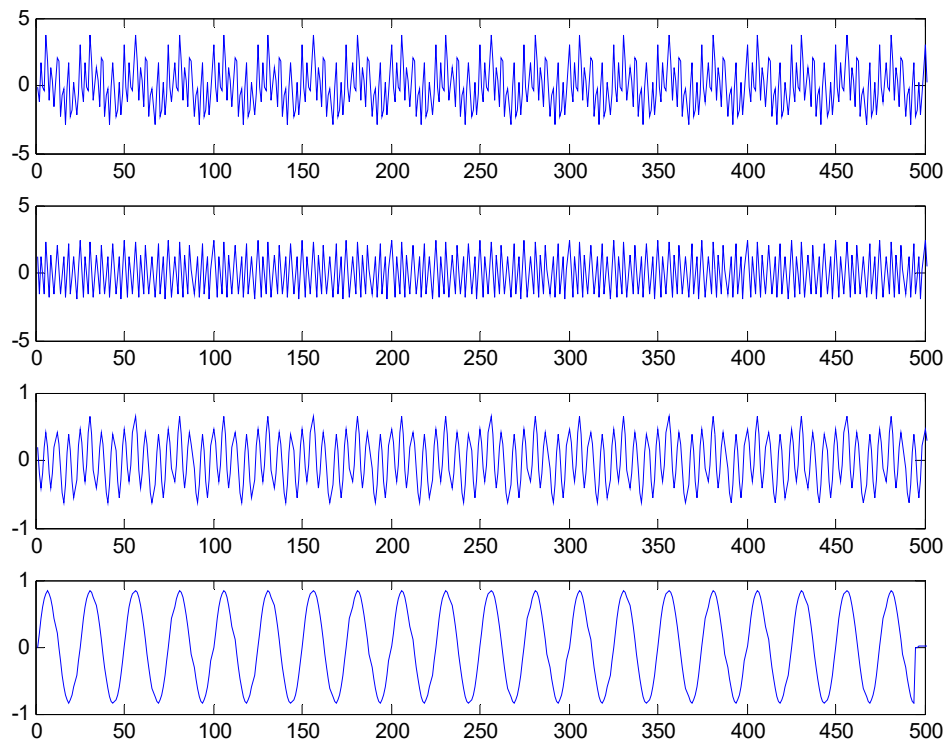


Рис. 3. Декомпозиция фрагмента сигнала на основе ЭФ

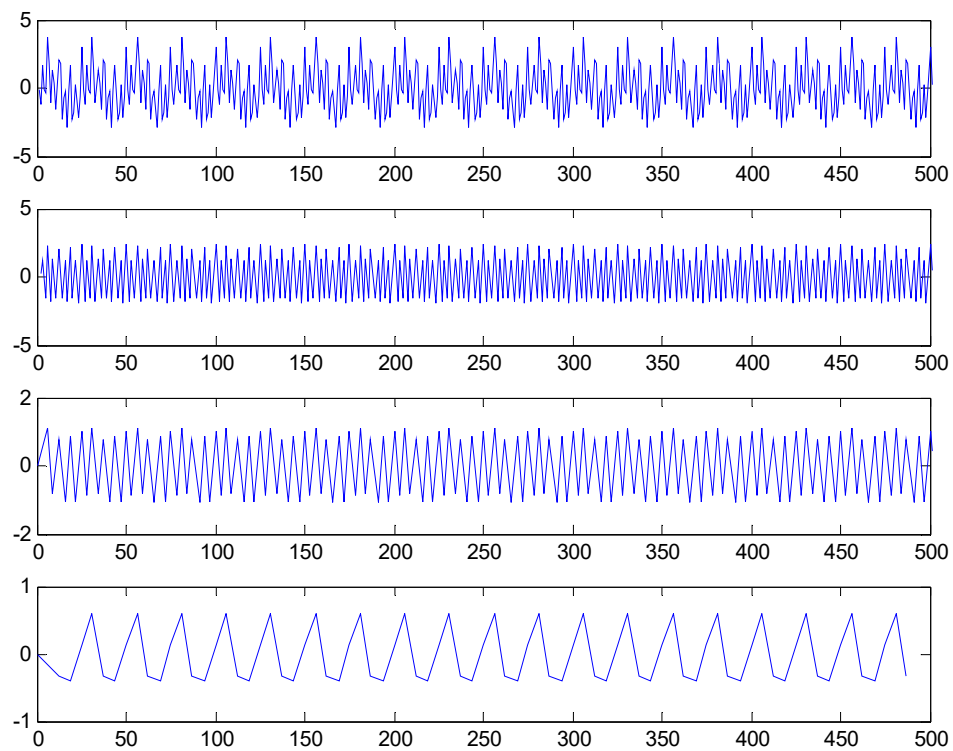


Рис. 4. Декомпозиция фрагмента сигнала на основе быстрого преобразования

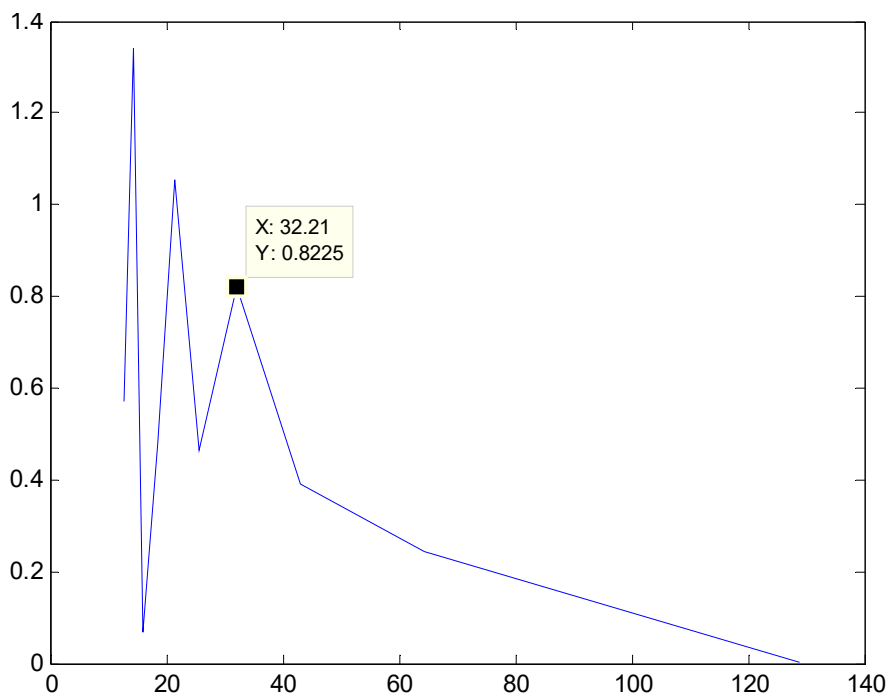


Рис. 5. Спектр модельного сигнала: по оси абсцисс частота в Гц, по оси ординат – амплитуды в размерных единицах

Таким образом, предложен еще один способ оценивания спектрального состава сигнала. Конечно, он больше подходит для анализа высокочастотных составляющих и особенно полезен в системах обнаружения, работающих на контрасте сигнал/шум, но может быть использован и в системах диагностики и контроля.

Так как декомпозиция широко используется в цифровой обработке сигналов, авторы уже предпринимали попытки усовершенствовать метод экстремальной фильтрации: на основе многократного интегрирования для изменения порядка выделения мод, на основе интегрирования-дифференцирования для разделения близких частотных компонент. Предложенный в этой статье вариант нацелен на уменьшение трудоемкости, он ориентирован на системы постоянного мониторинга, контроля и т.д. [5–7].

Заключение

Аппарат экстремальной фильтрации позволяет провести экспресс-оценку спектральных характеристик и выделить информативные составляющие. При этом метод ЭФ обладает наименьшей трудоемкостью и может быть использован в системах сейсмических наблюдений, в охранных системах, системах постоянного мониторинга ответственных объектов.

Библиографический список

1. **Ерохин, А. Т.** Алгоритм аппроксимации экстремумов многоэкстремальной функции гауссовскими полиномами / А. Т. Ерохин, Э. С. Кубанейшвили, В. Б. Лебедев // Методика измерения ускорения силы тяжести. – Москва : ИФЗ, АН СССР, 1973. – С. 81–96

2. **Ерохин, А. Т.** Аппроксимация многоэкстремальных функций и вопросы сжатого представления гравиметрической информации / А. Т. Ерохин // Методика измерения гравитационных полей. – Москва : ИФЗ, АН СССР, 1974. – С. 81–109.
3. **Мясникова, Н. В.** Экспресс-анализ сигналов в инженерных задачах / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, Б. В. Цыпин, М. Г. Мясникова. – Москва : Физматлит, 2016. – 184 с.
4. **Мясникова, Н. В.** «Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, А. А. Приймак, Д. С. Пичейкин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» : в 2 т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 221–223.
5. **Мясникова, Н. В.** Разложение на эмпирические моды на основе экстремальной фильтрации / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 4. – С. 13–17.
6. **Мясникова, Н. В.** Разложение на эмпирические моды на основе дифференцирования и интегрирования / Н. В. Мясникова, М. П. Берестень // Цифровая обработка сигналов. – 2016. – № 1. – С. 20–23.
7. **Мясникова, Н. В.** Разложение сигналов на моды с предварительным интегрированием и дифференцированием / Н. В. Мясникова, М. Г. Мясникова // Датчики и системы. – 2018. – № 6 (226). – С. 21–25.

References

1. Erokhin A. T., Kubaneyshvili E. S., Lebedev V. B. *Metodika izmereniya uskoreniya sily tyazhesti* [The method of measuring the gravity acceleration]. Moscow: IFZ, AN SSSR, 1973, pp. 81–96 [In Russian]
2. Erokhin A. T. *Metodika izmereniya gravitatsionnykh poley* [Method of measuring gravitational fields]. Moscow: IFZ, AN SSSR, 1974, pp. 81–109. [In Russian]
3. Myasnikova N. V., Beresten' M. P., Tsypin B. V., Myasnikova M. G. *Ekspress-analiz signalov v inzhenernykh zadachakh* [Express analysis of signals in engineering problems]. Moscow: Fizmatlit, 2016, 184 p. [In Russian]
4. Myasnikova N. V., Priymak A. A., Picheykin D. S. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika»: v 2 t.* [Automation and control issues in technical systems: proceedings of XXXIII International scientific and technical conference devoted to the 55th foundation anniversary of the sub-department “Automation and remote control”: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 221–223. [In Russian]
5. Myasnikova N. V., Beresten' M. P. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 2014, no. 4, pp. 13–17. [In Russian]
6. Myasnikova N. V., Beresten' M. P. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 2016, no. 1, pp. 20–23. [In Russian]
7. Myasnikova N. V., Myasnikova M. G. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 6 (226), pp. 21–25. [In Russian]

Мясникова Нина Владимировна

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: genok123@mail.ru

Myasnikova Nina Vladimirovna

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation
and remote control, Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Берестень Михаил Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: beresten@sura.ru

Beresten' Mikhail Petrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of automation
and remote control, Penza State
University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Приймак Антон Александрович

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: antton120@yandex.ru

Priymak Anton Aleksandrovich

Postgraduate student, Penza State
University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мясникова, Н. В. «Быстрый» алгоритм экстремальной фильтрации /
Н. В. Мясникова, М. П. Берестень, А. А. Приймак // Известия высших учеб-
ных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). –
С. 70–77. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-7.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ РЕФЛЕКТОРА АНТЕННЫ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектами исследования являются диаграммы направленности параболических антенн. Параболические антенны широко используются в задачах определения местоположения источника радиоизлучения. Одним из распространенных методов пассивной пеленгации является моноимпульсный метод, требующий достаточно точного знания формы и ориентации многолучевой диаграммы направленности антенны. В ходе длительной эксплуатации антенных систем происходит искажение диаграммы направленности, в частности, для космических систем пассивной пеленгации характерны периодические изменения формы рефлектора и, соответственно, диаграммы направленности антенны вследствие неравномерного прогрева. Смещение отдельных точек рефлектора антенны во многих случаях может быть измерено с высокой точностью и аппроксимировано поверхностью, которая представляет собой модель деформированного рефлектора. Однако полный пересчет многолучевой диаграммы направленности для антенны с деформированным рефлектором является вычислительно сложной задачей. Основной целью работы является повышение вычислительной эффективности метода определения параметров диаграммы направленности параболической антенны с учетом влияния деформации рефлектора. Рассмотрен и исследован метод оценки диаграммы направленности по данным о деформации антенны вдоль произвольного направления.

Материалы и методы. Результаты, представленные в работе, получены путем компьютерного моделирования на основе проведения расчетов диаграмм направленности методом блестящих точек. Основное внимание уделено учету линейной деформации рефлектора в двух соседних квадрантах, а также рассмотрены сложные деформации, состоящие из нескольких простых деформаций.

Результаты. Предложен и протестирован метод расчета смещения электрической оси и ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны при сложной деформации рефлектора на основе моделей простых деформаций рефлектора антенны. Показана применимость предложенного метода.

Выводы. Влияние малых деформаций антенны в произвольных направлениях можно рассматривать как суперпозицию деформаций во взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет оценить смещение электрической оси и изменение ширины главного лепестка диаграммы направленности при деформации вдоль произвольного направления без перерасчета диаграммы направленности.

Ключевые слова: параболическая антенна, диаграмма направленности, электрическая ось антенны, ширина главного лепестка, деформация рефлектора.

THE IMPACT OF ANTENNA REFLECTOR DEFORMATION ON DIRECTION DIAGRAM

Abstract.

Background. The objects of study are the radiation patterns of parabolic antennas. Parabolic antennas are widely used in the passive direction finding problem. The monopulse method is one of the most common methods of passive direction finding. It requires accurate knowledge of the shape and orientation of the multi-beam antenna pattern. Space antenna systems are characterized by periodic changes in the shape of the reflector due to uneven heating, which leads to the distortion of the antenna radiation pattern. In many cases the displacement of individual points of the antenna reflector can be measured with high accuracy and approximated by surface representing a model of deformed reflector. However, the complete recalculation of the multipath radiation pattern is a computationally complex task. The main purpose of the article is to increase the computational efficiency of determining the parameters of the antenna directional pattern, considering the reflector deformation.

Materials and methods. The results were obtained by computer simulation based on the calculation of radiation patterns using the brilliant point method. The article focuses on considering the linear deformation of the reflector in two adjacent quadrants and complex deformation, which consists of several simple deformations.

Results. The computational efficient method of radiation pattern parameters evaluating was proposed and investigated. The applicability of the proposed method is shown.

Conclusions. The effect of small deformations of the antenna reflector in arbitrary directions can be considered as a superposition of deformations in mutually perpendicular directions. This allows to estimate the displacement of the electric axis and the change of the main lobe width considering deformation along an arbitrary direction without recalculating the radiation pattern.

Keywords: parabolic antenna, radiation pattern, electric axis of the antenna, main lobe width, reflector deformation.

Введение

В настоящее время широкое практическое применение имеет решение задач как активной, так и пассивной пеленгации источников радиоизлучения. Методы пеленгации широко применяются в навигации для определения местоположения и параметров траектории различного рода наземных, морских, воздушных и космических объектов. Одним из распространенных методов пассивной пеленгации является однопозиционный (моноимпульсный) метод [1], требующий достаточно точного знания формы и ориентации многолучевой диаграммы направленности (ДН) антенной системы. В ходе длительной эксплуатации антенных систем происходят различные искажения ДН антенны, в частности, для космических систем пассивной пеленгации характерны периодические изменения формы рефлектора и, соответственно, диаграммы направленности антенны вследствие неравномерного прогрева. Для повышения точности измерений необходимо знать ДН рефлекторной антенны в реальном масштабе времени.

Для учета искажений рефлектора ДН антенны может быть вычислена с использованием методов, учитывающих электромагнитные взаимодействия

элементов антенны (метод моментов, метод физической оптики), но для больших отражателей подобные расчеты часто приводят к неприемлемым вычислительным затратам для заданного уровня точности. Для повышения вычислительной эффективности алгоритмов учета изменений параметров ДН параболической антенны вследствие влияния деформации рефлектора возникает необходимость в разработке методов, позволяющих по известной деформации рефлектора рассчитывать в реальном масштабе времени поправки к известной диаграмме направленности.

1. Расчет диаграммы направленности методом блестящих точек

Диаграмма направленности – это зависимость амплитуды напряженности, фазы и поляризации электрического поля от углов наблюдения (угла места θ и азимутального угла ϕ) при условии, что расстояние от точки наблюдения до антенны одно и то же [2]. Выбор расстояния ограничен требованием нахождения измерителя в дальней зоне антенны:

$$r \geq \frac{2L_A}{\lambda}, \quad (1)$$

где L_A – наибольший габаритный размер антенны; λ – длина волны; r – расстояние от антенны до точки наблюдения.

Расчет диаграмм направленности в работе производится методом блестящих точек [3, 4]. Предварительные исследования и сравнительный анализ результатов расчетов ДН параболических антенн данным методом и ДН, рассчитанных с использованием программного пакета GRASP (программное обеспечение разработано компанией TICRA, в качестве метода решения задачи пакет использует метод физической оптики, дополненный методом физической теории дифракции [5, 6]), показывают возможность проведения расчетов ДН рефлекторной антенны методом блестящих точек с приемлемой для исследований точностью.

Напряженность суммарного электрического поля, отраженного от всех точек поверхности рефлектора, в точке наблюдения P (рис. 1) находится по формуле

$$\mathbf{E}_P = \sum_{i=0}^N \frac{\mathbf{E}_i \exp(-jkr_i)}{r_i}; \quad r_i = a_i + b_i, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}_i$ – амплитуда напряженности электрического поля в i -й точке; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны в свободном пространстве; a_i – расстояние от облучателя до A_i -й точки на антенне; b_i – расстояние от A_i -й точки на антенне до точки наблюдения P ; N – количество узлов антенны.

На рис. 1 изображены рефлектор антенны и сфера наблюдения диаграммы направленности параболической антенны: P – точка наблюдения; a_i – расстояние от облучателя F до i -й точки на антенне; b_i – расстояние от i -й точки на антенне A до точки наблюдения P ; F – место расположения облучателя. Система координат $Oxyz$ связана с электрической осью антенны, начало координат расположено в фокусе антенны (месте расположения облучателя).

Наглядное представление о распределении энергии волн передающей антенны дает амплитудная характеристика направленности. Амплитудная

ДН – это зависимость амплитуды поля от угловых координат, которая задается выражением

$$E_p(\theta, \varphi) = \sqrt{\mathbf{E}_p(\theta, \varphi) \mathbf{E}_p^*(\theta, \varphi)}.$$

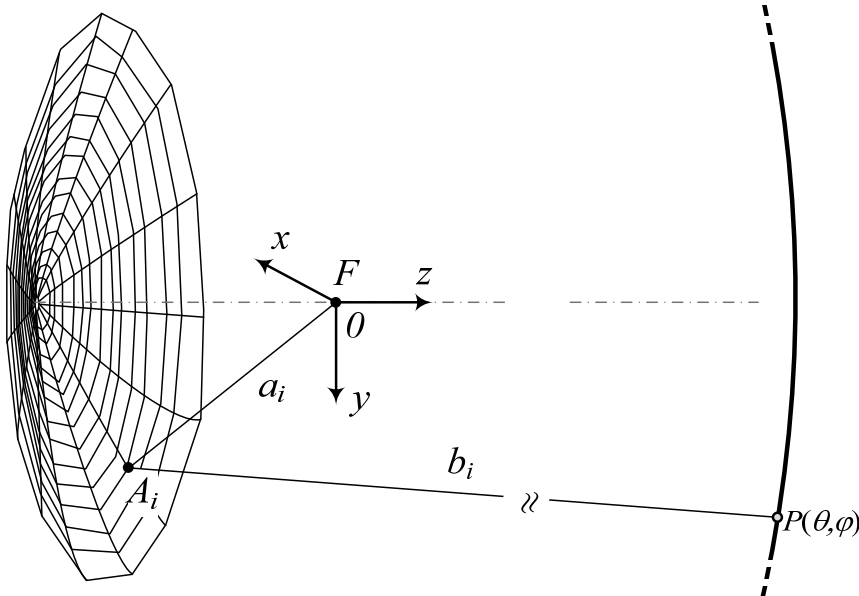


Рис. 1. Рефлектор антенны и сфера наблюдения

Метод блестящих точек обладает рядом преимуществ: прост в реализации, позволяет легко учитывать деформацию рефлектора и смещение облучателя из фокуса параболоида. Кроме того, вычислительная эффективность алгоритма расчета ДН на основе метода блестящих точек может быть существенно повышена на основе применения методики параллельного вычисления.

2. Деформация рефлектора

Идеальная параболическая антенна подвержена различным деформациям, возникающим при изготовлении и эксплуатации антенны. На практике изготовить антенну с рефлектором в форме идеального параболоида практически невозможно, что приводит к нарушению синфазности поля в раскрытии антенны [7]. Искажение формы рефлектора происходит и в процессе эксплуатации антенны: под воздействием силы тяжести, неравномерного прогрева поверхности рефлектора Солнцем, температурных перепадов. Большинство наземных антенных систем эксплуатируются на открытом воздухе и подвергаются воздействию солнечной радиации и других климатических факторов. Антенные системы на космической орбите периодически переходят со светлой на теневую сторону Земли и в результате этого подвергаются резким и значительным изменениям температуры поверхности рефлектора. В результате для космических систем пассивной пеленгации характерны периодиче-

ские изменения формы рефлектора вследствие неравномерного прогрева и, соответственно, искажения диаграммы направленности антенны.

Важной характеристикой параболической антенны является погрешность отклонения формы рефлектора от идеального параболоида. Вследствие деформации рефлектора антенны происходит искажение ДН, рост боковых лепестков, наблюдается угловое смещение направления главного максимума. Точность соблюдения формы рефлектора определяет также отклонение коэффициента усиления антенны от расчетного значения. С учетом влияния перечисленных выше факторов определяется допустимое суммарное отклонение профиля рефлектора антенны от идеального.

Исследования показывают [8], что характерная деформация, возникающая при одностороннем нагреве рефлектора антенны, может быть описана с помощью следующей модели: точки на поверхности рефлектора сдвигаются в α раз от своего истинного положения. Подобный тип деформации математически может быть представлен следующим образом:

$$\begin{aligned} F' &= F(\alpha_x x, \alpha_y y, z); \\ x &\rightarrow \alpha_{x>0} x, \quad x > 0; \quad x \rightarrow \alpha_{x<0} x, \quad x < 0; \\ y &\rightarrow \alpha_{y>0} y, \quad y > 0; \quad y \rightarrow \alpha_{y<0} y, \quad y < 0; \quad z \rightarrow z, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{x>0}$, $\alpha_{y>0}$, $\alpha_{x<0}$, $\alpha_{y<0}$ – параметры, отвечающие за степень вытянутости антенны в каждом из двух соседних квадрантах; F – поверхность идеального рефлектора; F' – поверхность деформированного рефлектора. Оси $0x$ и $0y$ расположены в плоскости раскрыва рефлектора, ось $0z$ совпадает с осью симметрии параболоида (рис. 1).

На рис. 2, а, б изображены случаи, когда деформация рефлектора происходит только в положительной области оси $0y$ или оси $0x$. Также на рис. 2, в изображена сложная деформация, которую можно представить как совокупность деформаций в положительной области оси $0x$ и в положительной области оси $0y$ (пропорциональный сдвиг точек в $\alpha_{x>0}$ и $\alpha_{y>0}$ раз от своего первоначального положения соответственно).

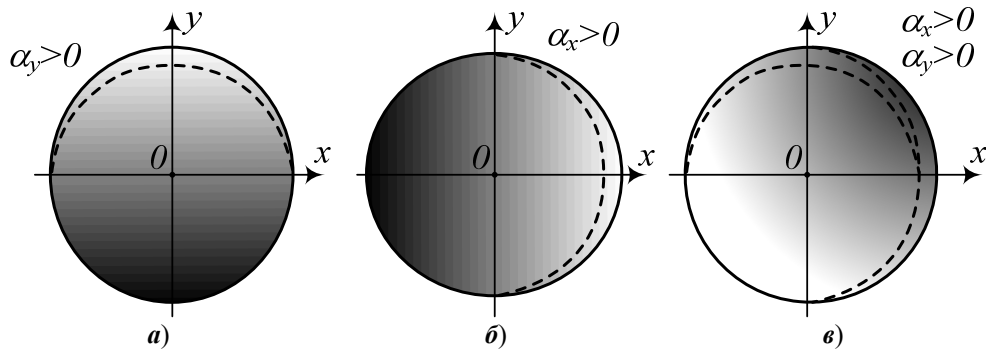


Рис. 2. Модель деформации рефлектора

При подобных деформациях рефлектора антенны происходит смещение электрической оси антенны и уширение главного лепестка луча без зна-

чительного изменения формы ДН [9], кроме того, несинфазность приходящих на облучатель волн приводит в том числе к эффекту деполяризации. Деполяризация излучения деформированной антенны при моделировании также может быть учтена на основе принципа суперпозиции [10]. Поскольку в работе рассматривается влияние малых деформаций на амплитудные ДН, вклад деполяризации предполагается пренебрежимо малым. Обозначим смещение электрической оси при деформации рефлектора (рис. 2), обусловленное деформацией вдоль оси Oy в положительной области как s^{y+} , а в отрицательной области как s^{y-} , соответственно для ширины главного лепестка w^{y+} и w^{y-} . Здесь и далее под шириной главного лепестка подразумевается ширина главного лепестка на уровне -3 дБ относительно максимума. Подобные обозначения введены для смещения электрической оси и ширины главного лепестка вдоль оси Ox .

В работе рассматриваются малые деформации поверхности антенны, когда величина деформации не превышает 5 % от радиуса рефлектора. В реальных системах величина деформации не превышает 1 %, но в работе максимальная величина деформации завышена, чтобы показать, что предельные величины реальных деформаций находятся не на границе рассматриваемой теории.

В линейном приближении деформацию рефлектора антенны можно представить следующим образом:

$$\Delta F \approx \frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y.$$

Поскольку амплитудная диаграмма направленности в дальней зоне, вообще говоря, представляет собой модуль преобразования Фурье от распределения токов по апертуре рефлектора (если не учитывать ДН облучателя), основываясь на свойствах преобразования Фурье, можно принять следующие приближения. В связи с тем, что сложную деформацию рефлектора можно представить как совокупность простых деформаций, примем, что и для расчета ДН антенны можно применить принцип суперпозиции, по крайней мере в области малых деформаций рефлектора. Зная смещение электрической оси s^{x-} , s^{x+} , s^{y-} , s^{y+} , можно найти смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора как сумму смещений электрической оси ДН при простых деформациях. Ширину главного лепестка при произвольной деформации также можно представить как сумму изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН:

$$\begin{aligned} s^{\text{деф}} &= s^{x+} + s^{y+} + s^{x-} + s^{y-}, \\ w^{\text{деф}} &= \Delta w^{x+} + \Delta w^{y+} + \Delta w^{x-} + \Delta w^{y-} + w^{\text{ид}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $s^{\text{деф}}$ – смещение электрической оси; $w^{\text{деф}}$ и $w^{\text{ид}}$ – ширина главного лепестка ДН антенны с деформированным и антенны с недеформированным рефлектором соответственно.

Зная значения смещения электрической оси и ширины главного лепестка ДН при простых деформациях рефлектора вдоль оси Ox и Oy , можно рас-

считать на основе выражения (4) смещение и ширину главного лепестка при произвольных малых деформациях рефлектора антенны. Применимость данной модели подтверждена далее в работе расчетами диаграмм направленности при простых деформациях методом блестящих точек и сравнением рассчитанных значений смещения электрической оси и ширины главного лепестка по выражению (4) с результатами, полученными при расчете ДН для заданной сложной деформации методом блестящих точек. При моделировании деформации рефлектора на его поверхности выделялись опорные точки, которые сдвигались от своего первоначального положения согласно выражению (3). Восстановление формы рефлектора по заданным опорным точкам с последующей равномерной дискретизацией проводилось с использованием интерполяционных кривых Эрмита [5].

3. Результаты моделирования

Реальные антенны, используемые в космических пеленгационных системах, имеют радиус раскрыва порядка 10 м. Рассмотрение антенн таких размеров связано со значительными вычислительными затратами, поэтому для установления общих зависимостей размер антенны и величина деформации были пропорционально уменьшены до приемлемых величин. В данной работе рассматривается расчет ДН осесимметричной однозеркальной длиннофокусной антенны со следующими параметрами: диаметр раскрыва $D = 1$ м, фокусное расстояние $F = 1,5$ м. Полный угол раскрыва составляет $37,85^\circ$. Облучатель находится в фокусе параболоида, длина волны $\lambda = 0,1$ м.

В качестве входных данных для расчета ДН методом блестящих точек использовались координаты точек на поверхности рефлектора с интервалом пространственной дискретизации $\lambda / 4$. При моделировании антенны оси Ox и Oy декартовой системы координат располагались параллельно плоскости раскрыва рефлектора, ось Oz совпадает с осью симметрии параболоида, начало координат находится в фокусе параболоида (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости ширины и направления электрической оси антенны от величины деформации рефлектора антенны для простых деформаций. Расчеты осуществлялись в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях при фиксированном азимутальном угле (рис. 3, а, б) и угле места (рис. 3, в, г) по положению электрической оси антенны. Из графиков видно, что при деформации рефлектора в разных парах соседних квадрантов смещение электрической оси ДН и изменение ширины главного лепестка происходит только в одной плоскости, оставаясь неизменной в другой.

В табл. 1 приведены дисперсии смещения электрической оси и ширины главного лепестка при простых деформациях рефлектора антенны в различных областях. При проведении исследования производился расчет сечений ДН по положению максимума относительной амплитуды при фиксированном значении $\theta = \text{const}$ (либо $\varphi = \text{const}$) и определение положения максимума в другом сечении ДН. Можно отметить, что при малых деформациях по оси Oy (либо оси Ox) на интервале изменения коэффициента деформации $\alpha \in [0,95; 1,03]$ параметры ДН меняются более значительно по сравнению с изменениями ДН в перпендикулярном сечении.

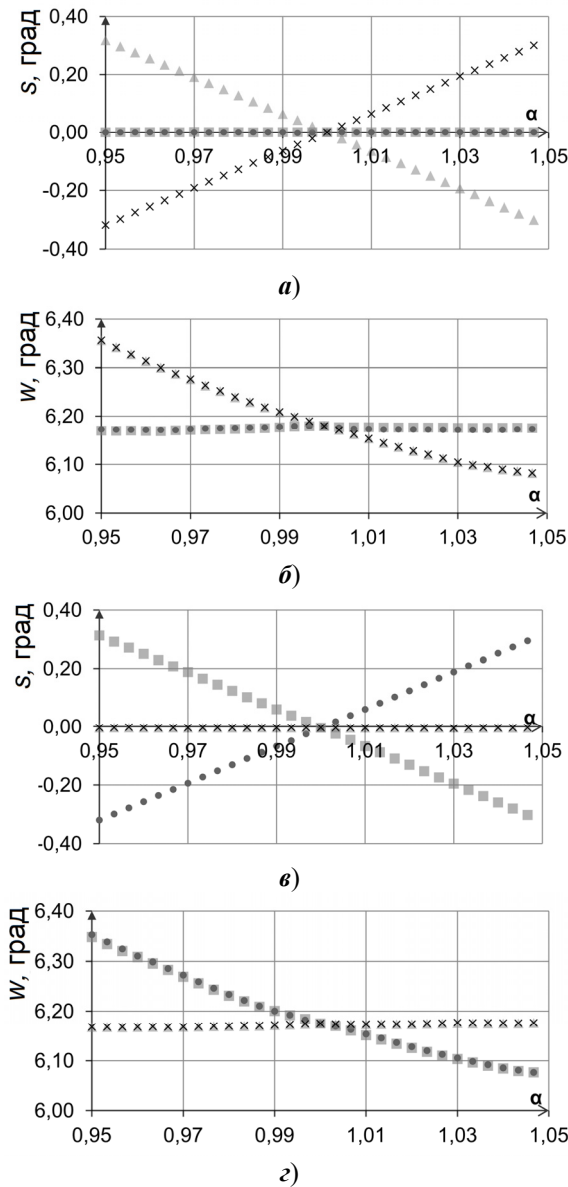


Рис. 3. Зависимость характеристик ДН от величины коэффициента деформации при простых деформациях рефлектора в различных областях ($0x < 0$, $0x > 0$, $0y < 0$, $0y > 0$) при фиксированном азимутальном угле (а, б) и фиксированном угле места (в, г)

На рис. 4 представлены результаты исследований зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль нескольких осей. Расчеты проводились для деформации рефлектора вдоль оси $0y$ в положительной области оси $0y$ при изменении в диапазоне $\alpha_{y+} \in [0.95; 1.05]$, при фиксированном значении деформации в одной из следующих областей:

- 1) в положительной области оси $0x$ при $\alpha_{x+} = 1.03$;
- 2) в отрицательной области оси $0y$ при $\alpha_{y-} = 1.03$.

Таблица 1

Область деформации	Дисперсия			
	Смещение электрической оси (град.) по положению максимума при		Ширина главного лепестка (град.) по положению максимума при	
	$\theta = \text{const}$	$\varphi = \text{const}$	$\varphi = \text{const}$	$\theta = \text{const}$
$\partial x > 0$	$2,07 \cdot 10^{-7}$	$3,48 \cdot 10^{-2}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$7,01 \cdot 10^{-3}$
$\partial x < 0$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$3,49 \cdot 10^{-2}$	$9,31 \cdot 10^{-6}$	$6,89 \cdot 10^{-3}$
$\partial y > 0$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$7,13 \cdot 10^{-3}$	$9,10 \cdot 10^{-6}$
$\partial y < 0$	$3,53 \cdot 10^{-2}$	$1,76 \cdot 10^{-7}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$	$9,52 \cdot 10^{-6}$

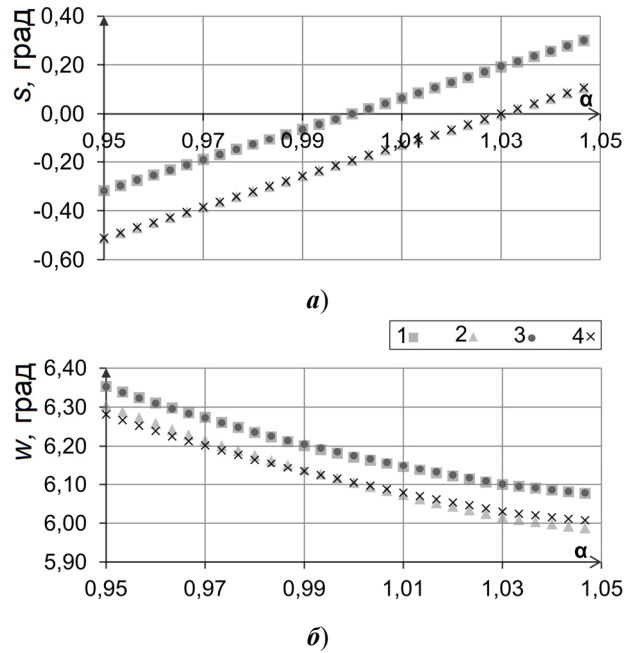


Рис. 4. Смещение электрической оси и ширина главного лепестка от величины деформации рефлектора по оси Oy при фиксированном коэффициенте деформации $\alpha_{x+} = 1,03$ (кривые 1, 3), $\alpha_{y-} = 1,03$ (кривые 2, 4)

Аналогичные результаты получаются при исследовании зависимости ширины главного лепестка и смещения электрической оси ДН при деформации рефлектора антенны вдоль положительного направления оси Ox при других фиксированных значениях деформации рефлектора. Полученные зависимости позволяют провести вычисление среднего квадрата ошибки между данными, полученными из численного моделирования методом блестящих точек и данными, полученными посредством расчетов по выражению (4), результаты расчета представлены в табл. 2.

Видно, что средние квадраты ошибок для данных, полученных с использованием выражения (4) и с использованием метода блестящих точек при одновременной деформации рефлектора в различных областях, имеют малые значения, что говорит о применимости принятых в работе приближений (см. выражение (4)).

Таблица 2

Области деформации рефлектора антенны		Средний квадрат ошибки данных, рассчитанных по формуле (4) и методом блестящих точек	
		Смещение электрической оси (град.)	Изменение ширины главного лепестка (град.)
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 0,95$	$7,29 \cdot 10^{-6}$	$21,07 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{y-} = 1,03$	$5,07 \cdot 10^{-6}$	$9,21 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 0,95$	$6,91 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_{y+} \in [0,95; 1,05]$	$\alpha_{x-} = 1,03$	$5,66 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$

Заключение

В работе предложен вычислительно эффективный метод для определения параметров ДН параболической антенны с учетом влияния деформации рефлектора антенны. В связи с тем что сложную деформацию рефлектора можно представить как совокупность простых деформаций, показано, что в области малых деформаций рефлектора антенны можно применить принцип суперпозиции и для расчета ДН. Смещение электрической оси ДН при сложной деформации рефлектора антенны может быть найдено как смещение электрической оси ДН при простых деформациях. Ширина главного лепестка при произвольной деформации также может быть представлена как сумма изменения ширины главного лепестка ДН при простых деформациях и ширины главного лепестка идеальной ДН. Для сравнения результатов в качестве «эталонного» метода моделирования и расчета смещения электрической оси и ширины главного лепестка ДН при сложной деформации рефлектора антенны использован метод блестящих точек. Сравнение результатов расчетов параметров ДН предложенным в статье методом, базирующимся на модели простых деформациях рефлектора антенны, с «эталонным» методом дал средний квадрат ошибки для смещения электрической оси и изменения ширины главного лепестка порядка 10^{-6} град.

Библиографический список

1. **Леонов, А. И.** Моноимпульсная радиолокация / А. И. Леонов, К. И. Фомичев. – Москва : Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. **Антенны : учеб. пособие** / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов и др. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 128 с.
3. **Горбалысов, М. С.** Моделирование влияния тепловых воздействий на антенны и характеристики радиолучевой системы / М. С. Горбалысов, А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 287–289.
4. **Якимов, А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – 258 с.
5. **Лаврентьева, А. С.** Расчет диаграммы направленности зеркальной антенны на основе данных о смещениях выделенных точек на поверхности рефлектора / А. С. Лаврентьева, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман, Ю. Е. Чуманкин // Труды XXII научной Конференции по радиофизике, посвящ. 100-летию Нижегород. радиолaborатории. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный ун-т, 2018. – С. 369–372.
6. **Курушин, А. А.** Расчет зеркальных параболических антенн с помощью современных САПР СВЧ / А. А. Курушин, Е. И. Лаврецкий, С. Е. Чадов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2014. – С. 126–131.

7. **Драбкин, А. Л.** Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. – Москва : Советское радио, 1974. – 536 с.
8. **Гурбаниязов, М. А.** Тепловые воздействия окружающей среды на зеркальные антенны / М. А. Гурбаниязов. – URL: <http://www.iki.rssi.ru/oct4/2011/ppt/s5/gurbaniyazov.pdf>
9. **Шишулин, Д. Н.** Оценка влияния деформации зеркала на излучение параболической антенны / Д. Н. Шишулин, А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 1. – С. 342–345.
10. **Якимов, А. Н.** Технология оценки деполяризации, возникающей при деформации микроволновых антенн / А. Н. Якимов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 226–229.

References

1. Leonov A. I., Fomichev K. I. *Monoimpul'snaya radiolokatsiya* [Monopulse radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 312 p. [In Russian]
2. Zyryanov Yu. T., Fedyunin P. A., Belousov O. A. et al. *Antenny: ucheb. posobie* [Antenna: teaching aid]. Tambov: Izd-vo TGTU, 2014, 128 p. [In Russian]
3. Gorbalysov M. S., Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2011, vol. 1, pp. 287–289. [In Russian]
4. Yakimov A. N. *Proektirovanie mikrovolnovykh antenn s uchetom vneshnikh vozdeystviy* [Microwave antenna design taking into account external actions]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, 258 p. [In Russian]
5. Lavrent'eva A. S., Morozov O. A., Fidel'man V. R., Chumankin Yu. E. *Trudy XXII nauchnoy Konferentsii po radiofizike, posvyashch. 100-letiyu Nizhegor. radio-laboratorii* [Proceedings of XXII scientific Conference on radiophysics devoted to the 100th anniversary of Nizhny Novgorod radio laboratory]. Nizhny Novgorod Nizhegorodskiy gosudarstvennyy un-t, 2018, pp. 369–372. [In Russian]
6. Kurushin A. A., Lavretskiy E. I., Chadov S. E. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2014, pp. 126–131. [In Russian]
7. Drabkin A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna feeder devices]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 536 p. [In Russian]
8. Gurbaniyazov M. A. *Teplovye vozdeystviya okruzhayushchey sredy na zerkal'nye anteny* [Thermal environmental influences on mirror antennas]. Available at: <http://www.iki.rssi.ru/oct4/2011/ppt/s5/gurbaniyazov.pdf> [In Russian]
9. Shishulin D. N., Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2011, vol. 1, pp. 342–345. [In Russian]
10. Yakimov A. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 226–229. [In Russian]

Лаврентьева Анна Сергеевна

студентка, Нижегородский
государственный университет имени
Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний
Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: anyuta.lavrentyeva@gmail.com

Lavrent'eva Anna Sergeevna

Student, Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod (23, Gagarina
avenue, Nizhny Novgorod, Russia)

Морозов Олег Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра информационных
технологий в физических исследованиях,
Нижегородский государственный
университет имени Н. И. Лобачевского
(Россия, г. Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23)

E-mail: oa_morozov@nifti.unn.ru

Morozov Oleg Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department
of information technology in physical
research, Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod (23, Gagarina avenue,
Nizhny Novgorod, Russia)

Чуманкин Юрий Евгеньевич

аспирант, Нижегородский
государственный университет имени
Н. И. Лобачевского (Россия, г. Нижний
Новгород, пр. Гагарина, 23)

E-mail: chumankinyuriy@nifti.unn.ru

Chumankin Yuriy Evgen'evich

Postgraduate student, Lobachevsky
State University of Nizhny Novgorod
(23, Gagarina avenue, Nizhny
Novgorod, Russia)

Образец цитирования:

Лаврентьева, А. С. Влияние деформации рефлектора антенны на диаграмму направленности / А. С. Лаврентьева, О. А. Морозов, Ю. Е. Чуманкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 78–89. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-8.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОПОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СМЕШИВАНИЯ ГАЗОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются аспекты, приводящие к более интенсивному перемешиванию газа, для наиболее полного сгорания образовавшейся турбулентной струи, которая используется в топочных процессах. Предмет исследования – модели нахождения наиболее оптимальной концентрации перемешивающихся газов. Целью работы является применение моделей определения концентраций перемешивающихся газов для автоматизированной системы управления топочным оборудованием.

Материалы и методы. Математическое моделирование с привлечением законов сохранения субстанций и химической аэротермодинамики, аналитическое и численное решение задач, вычислительный эксперимент.

Результаты. Была сформулирована задача о диффузионном горении двух газоздушных смесей – симбиоза моделей диффузионного и гомогенного режимов горения в турбулентном потоке. Разработана модель определения концентраций для автоматизированной системы подачи компонентов для диффузионного горения смеси и определены границы теоретической и практической применимости предложенной модели.

Выводы. Рассмотренные технологии потенциально применимы в системе автоматизированного управления процессами горения и показана высокая оценка их эффективности.

Ключевые слова: анализ тепломассообмена, автоматизация, управление, газ, модель, примесь, оптимизация сжигания.

N. K. Yurkov, R. A. Shtykov

THE IMPROVEMENT OF CONTROL SYSTEM OF FURNACE EQUIPMENT BY USING THE NEW MATHEMATICAL MODEL OF GAS MIXING

Abstract.

Backgrounds. The object of the study is the aspects leading to more intensive mixing of the gas, for the most complete combustion of the formed turbulent jet, which is used in combustion processes. The subject of the study is the model for finding the most optimal concentration of mixing gases. The aim of the work is the use of models for determining the concentrations of stirring gases for an automated control system of furnace equipment.

Materials and methods. Mathematical modeling with the use of the laws of conservation of substances and chemical aerothermodynamics, analytical and numerical solution of problems, computational experiment.

Results. The problem of diffusion combustion of two gas-air mixtures was formulated - the symbiosis of models of diffusion and homogeneous combustion regimes in a turbulent flow. A concentration determination model was developed for an automated component supply system for diffusion combustion of a mixture, and the theoretical and practical applicability of the proposed model was determined.

Conclusions. The technologies considered are potentially applicable in the system of automated control of combustion processes and a high assessment of their effectiveness is shown.

Keywords: heat and mass transfer analysis, automation, control, gas, model, admixture, combustion optimization.

Введение

Как показывает практика, используемые в топочных процессах горючие газы имеют сложный состав, включающий несколько горючих, пассивных (с точки зрения химической реакции) компонентов и кислород. В составе воздуха имеются, хотя и в малом количестве, горючие элементы. К тому же, малая предварительная добавка горючего к воздуху и воздуха (кислорода) к горючему газу может служить хорошим подспорьем при управлении тепло- и массообменными процессами в турбулентных потоках.

Поэтому необходимо разработать методы сжигания для автоматизированной системы подачи газов, чтобы обеспечить малый коэффициент избытка и учесть рециркуляцию продуктов горения в процессе сжигания.

Описание метода решения задачи исследования

Пусть горючее в своем составе имеет два горючих компонента (A_2 и A_3), брутто-реакции горения которых имеют вид

$$\begin{cases} A_2 + \nu_1 O_2 \rightarrow \nu_4 A_4 + \nu_5 A_5 + h_2^*, \\ A_3 + \nu_1'' O_2 \rightarrow \nu_4'' A_4 + \nu_5'' A_5 + h_3^*, \end{cases}$$

где h_i^* – теплотворная способность i -го компонента (Дж кг^{-1}); ν_i и ν_k – стехиометрические коэффициенты реагентов и продуктов реакции двух продуктов горения A_4 и A_5 , а также химически пассивного газа A_6 . Окислитель имеет в своем составе кислород O_2 (A_1) и A_6 – химически пассивный газ. Поэтому граничные условия во входных сечениях имеют вид:

– верхняя граница:

$$C_i = \begin{cases} < C_i >_2 & \text{для } i = 2, 3, 4, 5 \text{ и } 6, \\ 0 & \text{для } i = 1; \end{cases}$$

– нижняя граница:

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{для } i = 2, 3, 4, 5, \\ < C_i >_1 & \text{для } i = 1 \text{ и } i = 6. \end{cases}$$

Уравнения переноса и сохранения масс компонентов имеют вид

$$L(C_i) = \omega_i \quad (i = 1..6), \text{ притом } \omega_6 = 0,$$

где C_i – массовая концентрация i -го компонента газа в смеси (кг кг^{-1}); L – текущий расход газа; ω_i – массовая скорость образования/исчезновения i -го компонента газа ($\text{кг м}^{-3} \text{с}^{-1}$).

Определим концентрацию вводимых продуктов горения и инертных газов в зависимости от консервативной функции:

$$\begin{cases} C_4' = \langle C_4 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_4 \rangle_2 - \langle C_4 \rangle_1), \\ C_5' = \langle C_5 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_5 \rangle_2 - \langle C_5 \rangle_1), \\ C_6 = \langle C_6 \rangle_1 + \tilde{C}(\langle C_6 \rangle_2 - \langle C_6 \rangle_1). \end{cases}$$

Остается разобраться в активных газах и продуктах горения, где можно использовать, в частности, положения, что часть кислорода

$$C_{1O} = \langle C_1 \rangle_1 - \sum_{i=2}^{N_\alpha+1} \text{ распределяется между горючими } C_{1O} = \sum_{i=2}^{N_\alpha+1} C_{1O,i}.$$

Тогда для каждого отдельно взятого горючего компонента, а также соответствующих им частей кислорода и образуемых продуктов горения, вводятся нормированные функции Шваба – Зельдовича $\tilde{C}_{1O,i}$, последние из которых эквивалентны как между собой, так и с функциями, введенными для инертных газов. Место фронта пламени, определяемое согласно модели Я. Б. Зельдовича [1], для каждого из горючих компонентов будет

$$\tilde{C}_{iO}^* = \frac{v_{i,1} m_i C_{1O,i}}{v_{i,1} m_i C_{1O,i} + v_{1,i} m_1 (1 - k_+) \langle C_i \rangle_2} \quad (i = 2..N_\alpha + 1).$$

Но в одной зоне смещения не могут быть несколько фронтов пламени, так как после первого же фронта пламени со стороны горючего доступ кислорода к другим горючим компонентам прекращается. Такое суждение приводит к зависимостям:

$$\tilde{C}_{2O}^* = \dots = \tilde{C}_{(N_\alpha+1)O}^*.$$

Эти три системы линейных уравнений однозначно определяют нам неизвестные $\tilde{C}_{1O,i}$.

Полагаем, что исходный кислород в составе окислителя распределяется между горючими A_2 и A_3 : $\langle C_1 \rangle_1 = \langle C_{12} \rangle_1 + \langle C_{13} \rangle_1$, а концентрации некоторых компонентов состоят из трех частей:

$$C_i = C_i^O + C_i' + C_i'' \text{ при } i = 1, 4, 5,$$

где C_i^O – вводимые части; C_i' и C_i'' – соответствующие первой и второй горючим компонентам части концентраций.

Вводятся функции Шваба – Зельдовича для первого горючего:

$$\tilde{C}_2 = C_2 + \Omega_{24}' C_4', \quad \tilde{C}_1' = C_1' + \Omega_{1'4}' C_4', \quad \tilde{C}_5' = C_2 + \Omega_{25}' C_5'. \quad (1)$$

Подобным же образом для второго горючего имеем:

$$\tilde{C}_3 = C_3 + \Omega_{34}'' C_4'', \quad \tilde{C}_1'' = C_1'' + \Omega_{1''4}'' C_4'', \quad \tilde{C}_5'' = C_3 + \Omega_{35}'' C_5''.$$

Вводятся нормированные функции Шваба – Зельдовича:

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{C}}' &= \frac{\tilde{z}_i' - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i' \rangle_1} \text{ при } z_i' = C_2, C_1', C_5'; \\ \tilde{\tilde{C}}'' &= \frac{\tilde{z}_i'' - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1}{\langle \tilde{z}_i'' \rangle_2 - \langle \tilde{z}_i'' \rangle_1} \text{ при } z_i'' = C_3, C_1'', C_5''. \end{aligned}$$

Исключив промежуточные функции, определяются концентрации компонентов в зоне горючего.

Для первого горючего:

$$\begin{cases} C_2 = (\langle C_2 \rangle_2 + \Omega_{24}' \langle C_1' \rangle_1) \tilde{\tilde{C}} - \Omega_{24}' \langle C_1' \rangle_1, \\ C_4' = \langle C_1' \rangle_1 \Omega_{4'1}' (1 - \tilde{\tilde{C}}), \quad C_5' = \langle C_1' \rangle_1 \Omega_{5'4}' (1 - \tilde{\tilde{C}}); \end{cases}$$

для второго горючего:

$$\begin{cases} C_3 = (\langle C_3 \rangle_2 + \Omega_{34}'' \langle C_1'' \rangle_1) \tilde{\tilde{C}} - \Omega_{34}'' \langle C_1'' \rangle_1, \\ C_4'' = \langle C_1'' \rangle_1 \Omega_{4''1}'' (1 - \tilde{\tilde{C}}), \quad C_5'' = \langle C_1'' \rangle_1 \Omega_{5''4}'' (1 - \tilde{\tilde{C}}). \end{cases}$$

Концентрации в зоне окислителя для первого горючего:

$$\begin{cases} C_1' = \langle C_1' \rangle_1 - (\langle C_1' \rangle_1 + \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{1'2}') \tilde{\tilde{C}}; \\ C_4' = \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{4'2}' \tilde{\tilde{C}}, \quad C_5' = \langle C_2 \rangle_2 \Omega_{5'2}' \tilde{\tilde{C}}; \end{cases}$$

для второго горючего:

$$\begin{cases} C_1'' = \langle C_1'' \rangle_1 - (\langle C_1'' \rangle_1 + \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{1''3}'') \tilde{\tilde{C}}; \\ C_4'' = \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{4''3}'' \tilde{\tilde{C}}; \quad C_5'' = \langle C_3 \rangle_2 \Omega_{5''2}'' \tilde{\tilde{C}}. \end{cases}$$

Фронт пламени для этих горючих определяется в виде

$$\tilde{C}^* = \frac{1}{1 + \Omega_{21}' < C_2 >_2 / < C_1' >_1}, \quad (2)$$

$$\tilde{C}^{**} = \frac{1}{1 + \Omega_{31}'' < C_3 >_2 / < C_1'' >_1}. \quad (3)$$

Так как фронт пламени для горючих компонентов единый, то значения (2) и (3) должны совпасть: $\tilde{C}^* = \tilde{C}^{**}$.

Отсюда определяются доли горючих компонентов, соответствующие исходной концентрации кислорода:

$$< C_1' >_1 = \frac{\Omega_{1'3} < C_1 >_1 < C_2 >_2}{\Omega_{1'2} < C_3 >_2 + \Omega_{1'3} < C_2 >_2}, \quad < C_1'' >_1 = \frac{\Omega_{1'2} < C_1 >_1 < C_3 >_2}{\Omega_{1'2} < C_3 >_2 + \Omega_{1'3} < C_2 >_2},$$

поэтому

$$\tilde{C}^* = 1 / (1 + < C_3 >_2 \Omega_{31}'' + < C_2 >_2 \Omega_{21}')$$

и концентрации компонентов определяются в зоне горючего как:

$$\begin{cases} C_1 = 0, \\ C_2 = (< C_2 >_2 + \Omega_{24}' < C_1' >_1) \tilde{C} - < C_1' >_1 \Omega_{24}', \\ C_3 = (< C_3 >_2 + < C_1'' >_1 \Omega_{34}'') \tilde{C} - < C_1'' >_1 \Omega_{34}'', \\ C_4 = (< C_1' >_1 \Omega_{4'1} + < C_1'' >_1 \Omega_{4''1}) (1 - \tilde{C}) + < C_4 >_1 + (< C_4 >_2 - < C_4 >_1) \tilde{C}, \\ C_5 = (< C_1' >_1 \Omega_{5'4} + < C_1'' >_1 \Omega_{5''4}) (1 - \tilde{C}) + < C_5 >_1 + (< C_5 >_2 - < C_5 >_1) \tilde{C}; \end{cases}$$

а в зоне окислителя:

$$\begin{cases} C_1 = < C_1 >_1 - (< C_1 >_1 + < C_1 >_1 \Omega_{1'2} + < C_3 >_2 \Omega_{1''3}) \tilde{C}, \\ C_2 = 0, \quad C_3 = 0, \\ C_4 = (< C_2 >_2 \Omega_{4'2} + < C_3 >_2 \Omega_{4''3}) (1 - \tilde{C}) + < C_4 >_1 + (< C_4 >_2 - < C_4 >_1) \tilde{C}, \\ C_5 = (< C_2 >_2 \Omega_{5'2} + < C_3 >_2 \Omega_{5''3}) (1 - \tilde{C}) + < C_5 >_1 + (< C_5 >_2 - < C_5 >_1) \tilde{C}. \end{cases}$$

Массовая концентрация химически пассивного газа определяется единой формулой во всей области тепло- и массообмена:

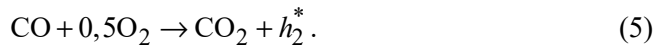
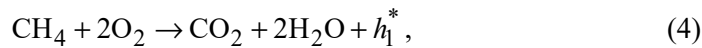
$$C_6 = < C_6 >_1 + (< C_6 >_2 - < C_6 >_1) \tilde{C}.$$

В пользу достоверности полученных выражений для концентраций компонентов можно привести следующие два факта. Во-первых, сумма массовых концентраций компонентов в каждой из зон (горючего и окислителя) равняется единице. Во-вторых, предполагается отсутствие одного из горючих компонентов в составе многокомпонентного горючего газа.

В качестве примера рассмотрено горение однородной смеси природного и доменного газов, вытекающих в бесконечное пространство покоящегося и спутного потока воздуха. Для простоты принимается, что природный газ состоит только из метана CH_4 ; доменный газ имеет массовый состав: 30 % – двуокись углерода CO , 10 % – углекислый газ CO_2 , 60 % – азот N_2 ; воздух имеет в составе один окислитель – кислород O_2 (23,2 %) и инертный газ – азот N_2 (76,8 %).

Через $C_{\text{П}}$ и $C_{\text{Д}}$ обозначены массовые доли природного и доменного газов в составе горючего, притом: $C_{\text{П}} + C_{\text{Д}} = 1$, т.е. горючее состоит только из природного и доменного газов.

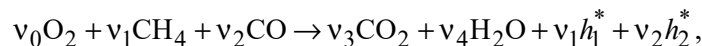
Каждое горючее имеет свое стехиометрическое уравнение:



В вычислениях за теплотворные способности приняты величины: для метана (h_1^*) – 11985 ккал/кг, а для двуокиси углерода (h_2^*) – 2450 ккал/кг.

Первоначальная концентрация кислорода $\langle C_{\text{O}} \rangle_1$ распределяется между метаном ($\langle C'_{\text{O}} \rangle_1$) и двуокиси углерода ($\langle C''_{\text{O}} \rangle_1$). Поэтому: $\langle C_{\text{O}} \rangle_1 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 + \langle C''_{\text{O}} \rangle_1$, где на основе описанного выше обобщения модели имеем $\langle C'_{\text{O}} \rangle_1 = \frac{\langle C_1 \rangle_1 \langle C_{\text{O}} \rangle_1}{\langle C_1 \rangle_2 + \langle C_2 \rangle_2 / 7}$.

Умножив уравнение (4) на $\langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / (v_{\text{O}_1} \langle C_{\text{O}} \rangle_1)$, а (5) – на $\langle C''_{\text{O}} \rangle_1 / (v_{\text{O}_2} \langle C_{\text{O}} \rangle_1)$ и складывая полученные равенства, придем к единому стехиометрическому уравнению для двух горючих компонентов:



где

$$v_0 = 1, \quad v_1 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / (2 \langle C_{\text{O}} \rangle_1), \quad v_2 = 2(1 - \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1),$$

$$v_3 = 2(1 - 0,75 \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1), \quad v_4 = \langle C'_{\text{O}} \rangle_1 / \langle C_{\text{O}} \rangle_1.$$

Согласно положениям обобщенной модели вместо N уравнений переноса и сохранения i -го компонента (для реагентов) получим единое уравнение

$$\tilde{L}(\tilde{C}) = 0 \quad \text{с граничными условиями во входном сечении:} \\ \langle \tilde{C} \rangle_1 = 0, \quad \langle \tilde{C} \rangle_2 = 1.$$

При диффузионном горении, как отмечено выше, максимальная температура имеет место на фронте пламени. При умеренных скоростях потока температура на фронте пламени остается одинаковой. С математической точки зрения этот факт достигается тогда, когда уравнения относительно $\bar{C}$ и $\bar{H}$ (относительно-избыточная полная энтальпия газовой смеси) становятся эквивалентными. Учитывая условия $Le \approx 1$ и $M \approx 0$, можно вычислить значения концентраций продуктов горения и химически пассивных газов, и температуры смеси на фронте пламени, не решая системы уравнений тепло- и массообмена в целом.

На рис. 1 приведены значения температуры на фронте пламени для различных значений T_1 и T_2 в виде функции от C_{II} . При массовом соотношении метана и доменного газа 1:1 температура на фронте пламени понижается не более чем на 50 °С, по сравнению со сгоранием чистого метана, и экономится более 7 % природного газа. Если доля природного газа в горючей смеси составляет 20 % от общей массы, то температура факела снижается на 100 °С и экономия основного топлива составляет 20 %. Наряду с этим достигается социальный эффект, выражающийся в уменьшении объема вредных выбросов в атмосферу.

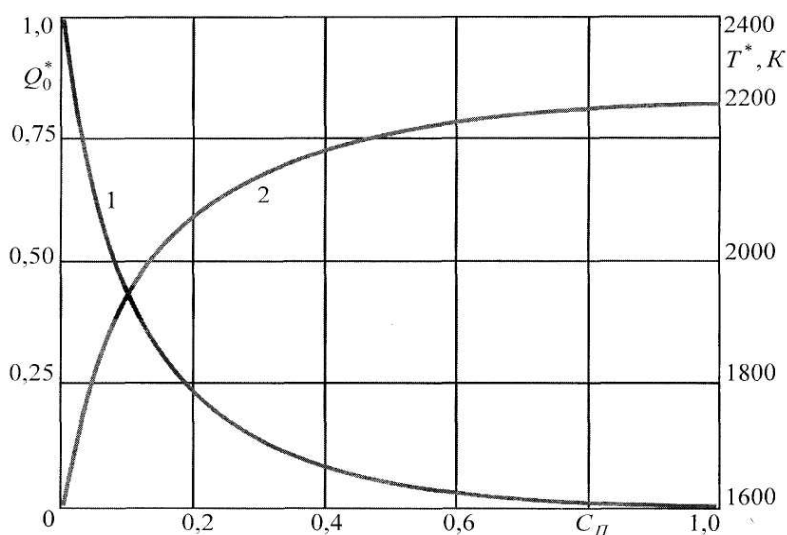


Рис. 1. Изменения доли доменного газа в теплоте сгорания (1) и температуры факела при $T_1 = T_2 = 300$ К (2) в зависимости от массовой доли метана в смеси метан + доменный газ, где T – температура (К) газовой смеси

Вернемся к более полной постановке решаемой задачи, которая формулируется в следующем виде. Одиночная струя горючего газа распространяется в затопленном воздухом неограниченном пространстве (рис. 2). В плоской постановке горючее истекает из бесконечной щели, образованной двумя параллельными плоскостями. Расстояние между плоскостями $2a$.

Изменением давления в расчетной области пренебрегается, что соответствует вполне расширенной струе. Не учитываются также сила тяжести и

излучение. Скорость потока – дозвуковая, а во входном сечении – кусочно-однородная. В качестве масштабных параметров выбираются a, u_2, T_1, ρ_1, H_1 .

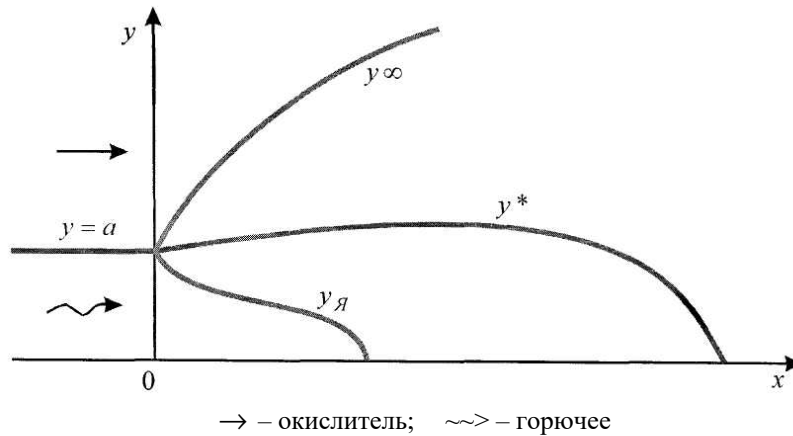


Рис. 2. Характерные линии одиночного струйного течения с факелом в осевом сечении Ox – плоскость/ось симметрии; $y_я$ – граница ядра струи; y^* – фронт пламени; $y_\infty = b(x)$ – условная граница струи

Процесс тепломассообмена описывается уравнениями турбулентных струйных течений многокомпонентного реагирующего газа [2] при равенстве единице значения коэффициента Льюиса ($Le=1$) и умеренных скоростях ($M \ll 1$) в плоской ($n=0$) постановке задачи.

Система замыкается обезразмеренным уравнением Менделеева – Клапейрона [2–5]:

$$\bar{\rho} = m / \langle m \rangle_1 \bar{T} \quad (p = \text{const}), \quad (6)$$

где ρ – плотность (кг м^{-3}) газовой смеси; T – температура (К) газовой смеси; p – гидростатическое давление (Па); $m = \left(\sum_{i=1}^N m_i / c_i \right)$; m_i – молярные массы газовой смеси и i -го компонента газа (кг моль^{-1}).

Выражением для температуры

$$\bar{T} = \frac{C_{p1}}{C_p} \left(H (H_2 - 1) - C_1 h_1^* - C_2 h_2^* \right), \quad (7)$$

где $c_p = \sum_{i=1}^N c_{pi} C_i$ и c_{pi} – теплоемкости газовой смеси и i -го компонента при

постоянном давлении ($\text{Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$); $H = c_p T + \frac{U^2}{2} + \sum_{i=1}^N c_i h_i^*$ – полная эн-

тальпия газовой смеси (Дж кг^{-1}), которое вытекает из безразмерного выражения полной энтальпии, определяется выражением для коэффициента турбулентной вязкости [2–5].

Здесь и далее

$$\bar{H} = (H - H_1) / (H_2 - H_1). \quad (8)$$

Граничными условиями служат:

$$\xi = 0: \begin{cases} \bar{u} = \bar{H} = \bar{C} = 1 & \text{при } 0 \leq \bar{\psi} \leq \bar{\psi}_1, \\ \bar{u} = \bar{H} = \bar{C} = 0 & \text{при } \bar{\psi}_1 < \bar{\psi} < \bar{\psi}_\infty; \end{cases} \quad (9)$$

$$\xi > 0: \begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial \bar{H}}{\partial \bar{\psi}} = \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{\psi}} = 0 & \text{при } \bar{\psi} = 0, \\ \bar{u} \rightarrow 0, \bar{H} \rightarrow 0, \bar{C} \rightarrow 0 & \text{при } \bar{\psi} \rightarrow \bar{\psi}_\infty, \end{cases}$$

где значения функции тока $\bar{\psi}$, $\bar{\psi}_1$, $\bar{\psi}_\infty$ вычисляются (согласно значению $n = 0$) по формулам:

$$\rho u y^n = \psi^n \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \rho v y^n = -\psi^n \frac{\partial \psi}{\partial x},$$

где y – поперечная (радиальная) координата, в частности, геодезическая отметка (нивелирная высота) оси трубы в точке x (м); ε – кинематический коэффициент турбулентной вязкости или коэффициент турбулентного обмена ($\text{м}^2 \text{с}^{-1}$); ψ – функция тока.

Для решения полученной системы с соответствующими граничными условиями привлекаются неявная схема аппроксимации и итерационный процесс. Решение протекает по маршевому методу по оси $O\bar{\xi}$.

Достоверность полученных численных результатов проверялась с помощью интегралов сохранения импульса и относительно-избыточной энтальпии вдоль свободной струи, которые в плоскопараллельном случае выглядят в безразмерных физических координатах следующим образом:

$$\int_0^{y+\infty} \bar{\rho} \bar{u}^2 d\bar{y} = \text{const}, \quad (10)$$

$$\int_0^{y+\infty} \bar{H} \bar{\rho} \bar{u} d\bar{y} = \text{const}. \quad (11)$$

Интенсивность горения проверялась с помощью вновь введенной функции кривой выгорания для двух горючих компонентов:

$$g(\chi\bar{x}) = \frac{I(0) - I(\chi\bar{x})}{I(0)},$$

$$\text{где } I(\chi\bar{x}) = \int_0^{y+\infty} (C_1 h_1^* + C_2 h_2^*) \bar{\rho} \bar{u} d\bar{y}.$$

При отсутствии одного из горючих компонентов ($C_1 > 2 = 0$ или $C_2 > 2 = 0$) эта функция превращается в обычную кривую выгорания для одного горючего компонента.

Проведены расчеты распространения смеси доменного и природного газов при значениях массовой концентрации природного газа $C_{II} = 0; 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,00$ при температуре горючего $T_2 = 500$ К, воздуха – $T_1 = 300$ К. Турбулентные числа Прандтля и Шмидта принимались равными $0,75$. Получены типичные для струйного течения профили продольной скорости, плотности и температуры. Некоторые из этих результатов представлены в виде графиков на рис. 3–7.

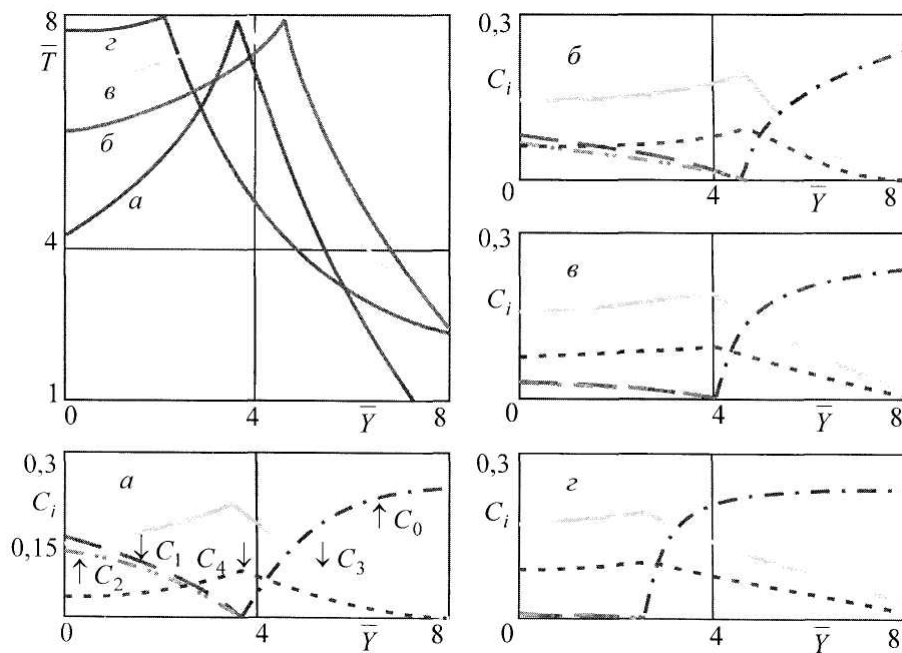


Рис. 3. Профили температуры и концентраций в плоской струе при сгорании смеси метана ($C_{II} = 0,25$) и доменного газа

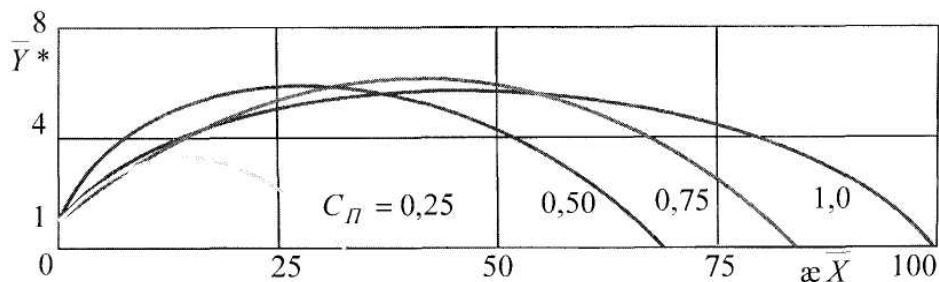


Рис. 4. Фронты пламени в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

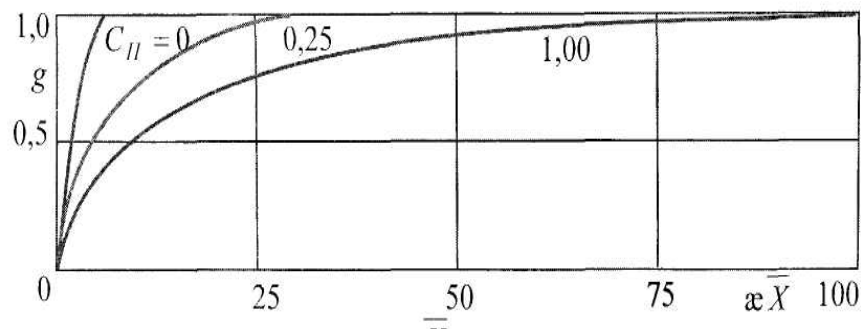


Рис. 5. Кривые выгорания $g(\chi\bar{x})$ в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

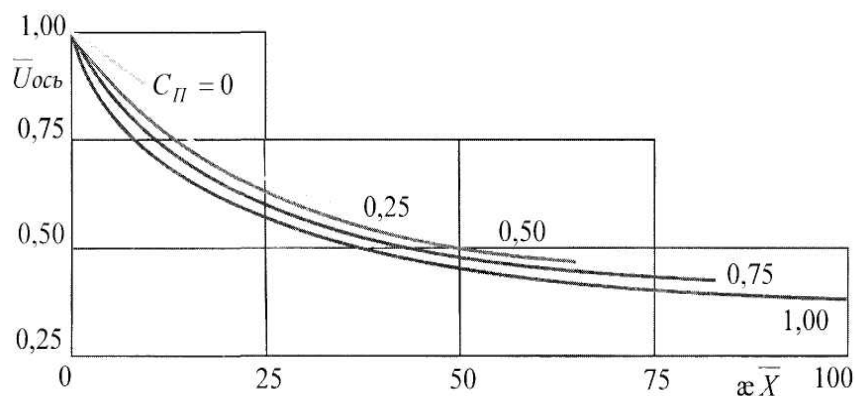


Рис. 6. Осевые значения скорости в плоской струе при различных значениях доли метана (C_{II}) в горючей смеси метана и доменного газа

На рис. 3 приведены профили температуры и массовых концентраций (кроме химически пассивного газа) в различных сечениях при $C_{II} = 0,25$, а на рис. 4 – формы фронтов пламени для $C_{II} = 0; 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,00$.

Обозначения a , b , v и z соответствуют сечениям $\chi\bar{x} = 4,62; 10,9; 17,9; 25,5$.

Как известно, при изотермическом распространении данной смеси в воздухе с увеличением C_{II} импульс потока уменьшается, а граница потока усиленно расширяется. Последний фактор должен был способствовать интенсивному перемешиванию и горению. Но при наличии химического взаимодействия этот фактор не оказался определяющим для длины фронта пламени. Удлинение фронта пламени с увеличением C_{II} , по нашему мнению, можно объяснить насыщенностью горючей смеси метаном. Как видно из стехиометрических соотношений, для окисления (сгорания) одной молекулы двуокиси углерода достаточно полмолекулы кислорода, в то время как для метана требуются две молекулы. Благодаря этому фронт пламени при сгорании метана получается в 15 раз длиннее, чем при сгорании доменного газа (если предположить, что доменный газ горит в воздухе). Из-за этой несоразмерности форма фронта пламени для $C_{II} = 0$ на рис. 4 не приведена.

На рис. 5 изображены кривые выгорания для $C_{\Pi} = 0; 0,25; 0,50$ и $1,00$. Формы фронтов пламени этих кривых типичны для затопленных струй с диффузионным пламенем, т.е. основная часть горючего вступает в реакцию в непосредственно близкой к срезу сопла области течения.

Изменения осевого значения продольной составляющей скорости вдоль течения при различных значениях C_{Π} представлены на рис. 6. Большие отклонения осевых значений скорости заметны на близких к срезу сопла участках. А в дальнейшем они приближаются друг к другу.

Заключение

В статье рассматриваются аспекты, приводящие к более интенсивному перемешиванию газа, для наиболее полного сгорания образовавшейся турбулентной струи, которая используется в топочных процессах. Исходя из насущных интересов газопользующих отраслей производства и теории турбулентных течений газов, выражающихся в экономии основных ресурсов топлива и учете многокомпонентности горючего и окислителя была сформулирована задача о диффузионном горении двух газозвушных смесей – симбиоза моделей диффузионного и гомогенного режимов горения в турбулентном потоке. Разработана модель определения концентраций для автоматизированной системы подачи компонентов для диффузионного горения смеси и определены границы теоретической и практической применимости предложенной модели. Адекватность предложенной модели решения диффузионной задачи доказана: суммированием концентраций компонентов в зонах горючего и окислителя; стехиометрическим поступлением горючих газов и кислорода (воздуха) к фронту пламени; сопоставлением численных результатов с экспериментальными и теоретическими данными по сжиганию смеси в воздухе.

Так как природный газ имеет в своем составе ряд компонентов: метан, этан, пропан, азот и др., в составе добываемого из различных месторождений в разное время природного газа эти компоненты имеют различные концентрации. Правильно подобранная концентрация горючего меняет характеристики природного газа, что и влияет на процессы тепло- и массообмена при его сжигании с образованием минимального количества балласта. Для решения данной задачи и были разработаны методы в рамках диффузионного горения смеси с одним и многими горючими компонентами и определены границы теоретической и практической применимости предложенных способов. При этом показано, что при замене половины природного газа (по массе) доменным газом температура на факеле снижается на ≈ 50 °С, факел укорачивается на 3/10 часть и экономия топлива горючего составляет более 7 %.

Библиографический список

1. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников и др. ; под ред. Г. Н. Абрамовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Наука, 1984. – 716 с.
2. Лапин, Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа / Ю. В. Лапин. – Москва : Наука, 1982. – 312 с.
3. Гостинцев, Ю. А. Турбулентные струйные течения в страфицированной атмосфере : препринт : в 2 ч. / Ю. А. Гостинцев, О. О. Едгоров, Р. А. Файзиев. – Черноголовка , Изд. ИХФ АН СССР, 1989. – Ч. 1. – 87 с.; 1990. – Ч. 2. – 98 с.

4. Методы расчета турбулентных течений : пер. с англ. / под ред. В. Кольмана. – Москва : Мир, 1984. – 464 с.
5. Турбулентные течения реагирующих газов / под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. – Москва : Мир, 1983. – 328 с.

References

1. Abramovich G. N., Girshovich T. A., Krashennnikov S. Yu. et al. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of turbulent jets]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Nauka, 1984, 716 p. [In Russian]
2. Lapin Yu. V. *Turbulentnyy pogranichnyy sloy v sverkhzvukovykh potokakh gaza* [Turbulent boundary layer in supersonic gas flows]. Moscow: Nauka, 1982, 312 p. [In Russian]
3. Gostintsev YU. A., Yodgorov O. O., Fayziyev R. A. *Turbulentnyye struynnye techeniya v stratifitsirovannoy atmosfere: preprint v 2-kh ch.* [Turbulent jet flows in a stratified atmosphere: preprint in 2 parts]. Chernogolovka: Izd. IKHF AN SSSR, 1989, part 1, 87 p. (1990, part 2, 98 p.) [In Russian]
4. *Metody rascheta turbulentnykh techeniy: per. s angl.* [Methods for calculating turbulent flows: translated from English]. Ed. V. Kol'man. Moscow: Mir, 1984, 464 p. [In Russian]
5. *Turbulentnyye techeniya reagiruyushchikh gazov* [Turbulent flows of reacting gases]. Eds. P. Libbi, F. Vil'yams. Moscow: Mir, 1983, 328 p. [In Russian]

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of radio equip-
ment design and production, Penza State
University (40, Krasnaya street,
Penza, Russia)

Штыков Роман Александрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики и прикладной
математики, Муромский институт
(филиал) Владимирского
государственного университета
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых
(Россия, Владимирская область,
г. Муром, ул. Орловская, 23)

E-mail: fpm@mivlgu.ru

Shtykov Roman Aleksandrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of physics
and applied mathematics, Murom Institute
(branch) of Vladimir State University
named after Alexander and Nikolay
Stoletovs (23, Orlovskaya street, Murom,
Vladimir region, Russia)

Образец цитирования:

Юрков, Н. К. Совершенствование системы управления топочным оборудованием за счет использования новой математической модели смешивания газов / Н. К. Юрков, Р. А. Штыков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 90–102. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-9.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621

DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-10

Т. Н. Иванова, И. А. Ратников, А. Ю. Муйземнек

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Типовыми конструкторскими и технологическими задачами, которые решаются при создании различных изделий машиностроения, являются назначение размеров детали, выбор материала, определение рационального способа получения заготовки и самой детали и др. Современные компьютерные технологии позволяют сократить продолжительность и исключить возможные ошибки при решении типовых конструкторских и технологических задач. Целью работы являлось совершенствование методов решения типовых конструкторских и технологических задач, которые возникали при создании характерной для автомобилестроения детали.

Материалы и методы. При решении задачи выбора рассматривались следующие материалы: МСт.6 ГОСТ 380–50, сталь 45 ГОСТ 1050–2013, сталь 60 ГОСТ 1050–2013, чугун СЧ15 ГОСТ 1412–85, чугун СЧ30 ГОСТ 1412–85, алюминий АК7 ГОСТ 1583–93, латунь Л60 ГОСТ 15527–2004, пластик ABS 2020-31 ТУ 2214-019-00203521–96. При компьютерном моделировании использовались программы Компас-3D и SolidWorks.

Результаты. На примере решения типовых конструкторских и технологических задач, которые возникали при создании характерной для автомобилестроения детали, показаны возможные усовершенствования методов их решения.

Выводы. Применение усовершенствованных методов, которые возникали при создании характерной для автомобилестроения детали, позволили рекомендовать для ее изготовления сталь 45 ГОСТ 1050-2013, заготовку-поковку выполнять горячей объемной штамповкой на горизонтально-ковочной машине, а также создать конструкторско-технологическую документацию на изготовление детали.

Ключевые слова: типовые конструкторские и технологические задачи, компьютерные технологии, назначение размеров детали, выбор материала, рациональный способ получения заготовки и детали.

Т. Н. Иванова, И. А. Ратников, А. Ю. Муйземнек

© Иванова Т. Н., Ратников И. А., Муйземнек А. Ю., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

THE METHODS IMPROVEMENT FOR SOLVING TYPICAL DESIGN AND TECHNOLOGICAL TASKS BY USING COMPUTER MODELING

Abstract.

Background. Typical design and technological problems that are solved when creating various engineering products are the designation of part sizes, the choice of material, the determination of a rational way to obtain the workpiece and the part itself, etc. Modern computer technologies can reduce the duration and eliminate possible errors when solving typical design and technological problems. The aim of the work was to improve the methods for solving typical design and technological problems that arose during the creation of a part typical for the automotive industry.

Materials and methods. When solving the selection problem, the following materials were considered: MST.6 State Standart 380-50, steel 45 State Standart 1050-2013, steel 60 GOST 1050-2013, cast iron Sch15 GOST 1412-85, cast iron SCH30 State Standart 1412-85, aluminum AK7 State Standart 1583-93, brass L60 State Standart 15527-2004, plastic ABS 2020-31 TU 2214-019-00203521-96. Research of modeling processes was performed using Компас-3D and SolidWorks simulation programs.

Results. On the example of solving typical design and technological problems that arose during the creation of a part typical for the automotive industry, possible improvements to methods for solving them are shown.

Conclusions. The application of advanced methods in the creation that arose during the creation of a part typical for the automotive industry made it possible to recommend using steel 45 State Standart 1050-2013, forging a blank forging by hot forging on a horizontal forging machine, and also creating design and technological documentation for manufacturing the details.

Keywords: typical design and technological tasks, computer technology, the designation of the dimensions of the part, the choice of material, the rational method of obtaining the workpiece and the part.

Введение

Типовыми конструкторскими и технологическими задачами, которые решаются при создании различных изделий машиностроения, являются назначение размеров детали, выбор материала, определение рационального способа получения заготовки и самой детали и др. Современные компьютерные технологии позволяют сократить продолжительность и исключить возможные ошибки при решении типовых конструкторских и технологических задач. Целью работы являлось совершенствование методов решения типовых конструкторских и технологических задач, которые возникали при создании характерной для автомобилестроения детали.

В качестве характерной для автомобилестроения детали была выбрана чашка дифференциала автомобиля ЗИЛ-130 – деталь 130-2403020-2 «Чашка дифференциала левая».

1. Постановка задачи

Деталь 130-2403020-2 представляет собой корпусную деталь вращения, входящую в состав дифференциала заднего моста автомобиля ЗИЛ-130. Она воспринимает крутящий момент от главной передачи по ведомой цилиндрической шестерне и передает его через сателлиты на полуосевые шестерни.

С внутренней части чашки крепится крестовина дифференциала, на которой вращаются сателлиты. На внешней части чашки жестко закреплены ведомая шестерня и роликовый конический подшипник. Чертеж детали 130-2403020-2 показан на рис. 1.

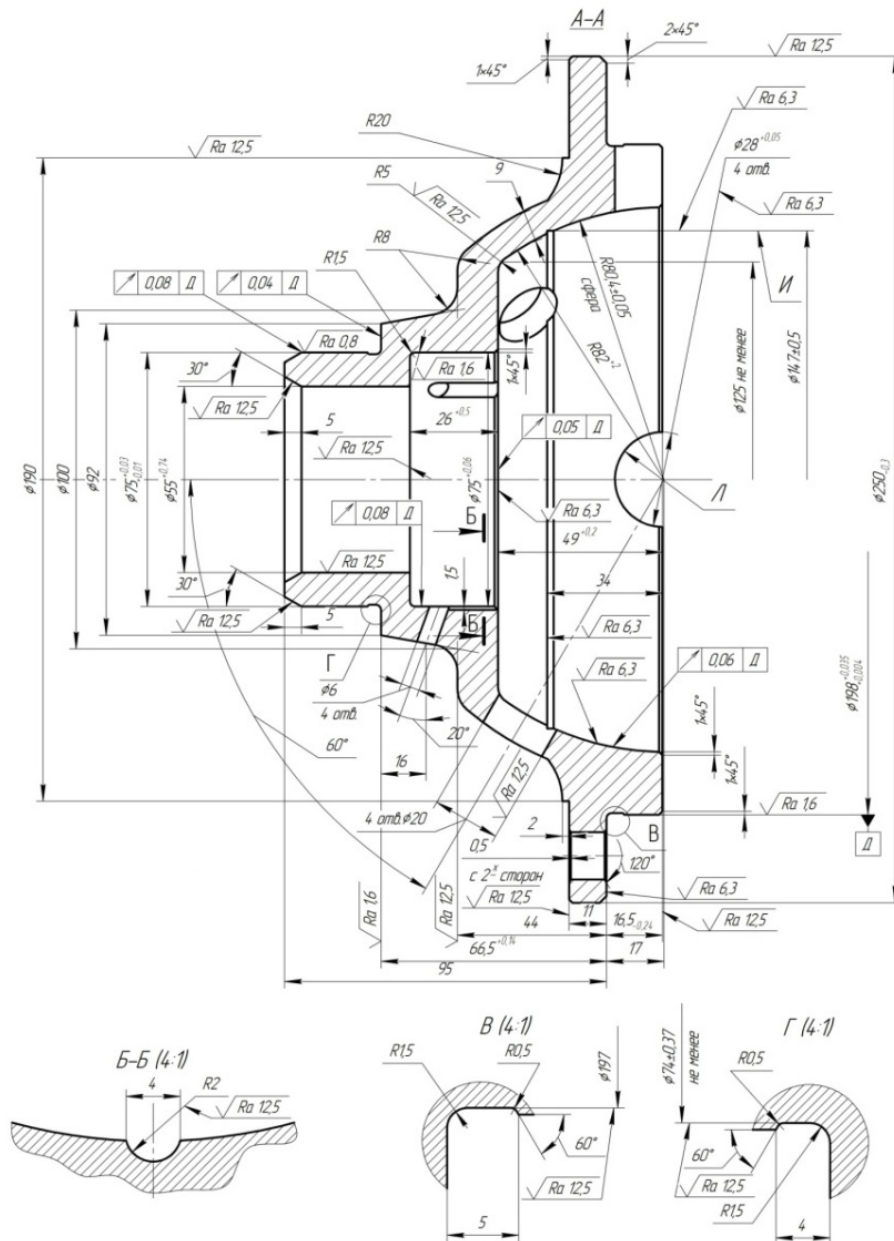


Рис. 1. Чертеж детали 130-2403020-2 «Чашка дифференциала левая»

При постановке автомобиля ЗИЛ-130 на производство чашка дифференциала изготавливалась из стали МСт.6. Данная сталь поставлялась в соответствии с ГОСТ 380–50 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки». Она являлась маргеновской сталью группы Б с содержанием углерода

0,38...0,50 %. Буква М в марке стали регламентировала способ выплавки, если данная буква отсутствовала, то сталь относилась к группе А, и способ изготовления выбирался заводом-изготовителем. Данная сталь изготавливалась в мартеновских печах, которые были распространены во время производства детали. У такого вида производства стали были недостатки: низкая экономичность, высокое количество отходов металла, сложность и дороговизна обслуживания печей, невозможность получить сталь высокого качества, долгое время плавки металла, крайне высокое количество выброса вредных веществ в атмосферу, малая производительность труда, тяжелые, вредные и опасные условия труда рабочих. К достоинствам можно было отнести низкие требования к качеству сырья и способность переплавлять металлолом. На данный момент сталь МСт.6 на территории Российской Федерации не производится. Последней редакцией упомянутого выше стандарта является ГОСТ 380–2005 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки». В нем сталь МСт.6 как вид прекратила свое существование. В действующем стандарте остались стали бывшей группы А, а сама классификация на две группы исчезла. Поэтому возникла потребность в замене материала на современный аналог с параметрами, отвечающим техническим требованиям и функциональному назначению детали.

При решении этой задачи, а также задач определения рационального способа получения заготовки и детали, необходимо учитывать габаритные размеры детали, особенности формы, требования к точности размеров и качеству поверхностей.

Наибольшими габаритными размерами детали 130-2403020-2 являются диаметр 250 мм и длина 111,5 мм. Квалитет точности варьируется от 14 до 6, шероховатость от $R_a 25$ до $R_a 0,8$ (рис. 1). Масса детали составляет 6,58 кг. В детали присутствуют 12 отверстий диаметром 14 мм, 4 отверстия диаметром 6 мм, по 4 отверстия диаметрами 20 и 28 мм, которые получаются при сверлении. Группа отверстий диаметром 28 мм создается в собранном комплекте чашек дифференциала. Отверстие диаметром 55 мм пробивается на этапе создания заготовки и затем механически обрабатывается. За счет отверстий диаметром 6 мм, канавок радиусом R2 и проточки диаметром 147 мм обеспечивается подача, распределение и удержание масла в рабочем механизме дифференциала для обеспечения смазывания, охлаждения и предотвращения коррозии сателлитов и шестерней. Особо ответственной поверхностью является диаметр 75 мм с шероховатостью $R_a 0,8$ на которую запрессовывается подшипник. Наименее ответственные поверхности расположены с наружной поверхности чашки в диапазоне диаметров 190–92 мм с радиусами R20 и R8, которые получаются в заготовке и не обрабатываются в дальнейшем. Наружные и внутренние поверхности обрабатываются на токарном оборудовании с ЧПУ, все отверстия, а также сквозные пазы радиусом R2 создаются на фрезерном оборудовании с ЧПУ.

2. Определение рационального способа получения заготовки

Для того чтобы выбрать наиболее оптимальный метод получения заготовки, требуется проанализировать влияние на деталь следующих факторов: материал, форма, габаритные размеры, масса, технические требования, объем и серийность выпуска, коэффициент использования материала. В результате

должен быть выбран метод, обеспечивающий максимальную технологичность, минимальную трудоемкость и себестоимость изготавливаемого изделия.

Материал является одним из основополагающих факторов, определяющих способ получения заготовки. В соответствии с конструкцией и эксплуатационными характеристиками детали наиболее оптимальным вариантом по механическим свойствам является Сталь 45 ГОСТ 1050–2013 (зарубежные аналоги 1044, 1045 США, 1.1191, 2C45 Евросоюз, 45 Польша, 12050, 12056 Чехия), которая входит в класс качественных конструкционных углеродистых сталей. Для изготовления отливок данная сталь не подходит, так как имеет неудовлетворяющие химический состав и механические свойства. Наиболее близкий аналог стали, из которой можно изготовить данное изделие, Сталь 45Л, которая поставляется в соответствии с ГОСТ 977–88, но, относительно стали 45, высокая пластичность и более низкий предел прочности данной стали могут снизить эксплуатационный срок детали.

Теоретические исследования выбора материала детали 130-2403020-2, показали, что рациональными заготовками являются все виды поковок и круглый сортовой прокат.

Конструктивная форма детали относится к сложной цилиндрической с криволинейными поверхностями и сквозным центральным отверстием. Данные особенности конструкции predisполагают к изготовлению заготовки штамповкой или отливкой. Наименее рентабельным и крайне трудозатратным является изготовление данной детали из сортового проката.

Технические требования детали соответствуют двум видам заготовок – поковка и отливка.

Анализируя тип производства и массу детали, условно могут быть выбраны все способы получения заготовок, но с ограничениями. Использование сортового проката невозможно из-за крайне низких показателей материалоемкости, создание поковок свободной ковкой также нецелесообразно из-за высоких трудозатрат и низкой точности получаемых заготовок, использование отливок в данном случае требует частичного изменения конструкции или снижение эксплуатационных характеристик конечного изделия.

Завершающим фактором выбора способа получения заготовки является определение коэффициентов использования материала.

Рассматриваемыми видами заготовок были: отливки; поковки, полученные горячей штамповкой; сортовые материалы, полученные прокатом металла (рис. 2–4). Не были рассмотрены такие способы получения заготовок, как заготовки, полученные холодной штамповкой из листа, прессованием порошков, так как из данных видов заготовок невозможно создать требуемую конструкцию детали.

Расчет коэффициента использования материала КИМ осуществлялся по следующим зависимостям:

$$\text{– для круглого сортового проката } \text{КИМ} = \frac{m_{\text{дет}}}{m_{\text{заг}}} = \frac{6,58}{32,5} = 0,20,$$

где $m_{\text{дет}}$, $m_{\text{заг}}$ – масса детали и заготовки соответственно;

$$\text{– для поковки } \text{КИМ} = \frac{m_{\text{дет}}}{m_{\text{заг}}} = \frac{6,58}{8,36} = 0,79.$$



Рис. 2. Массовые характеристики готовой детали

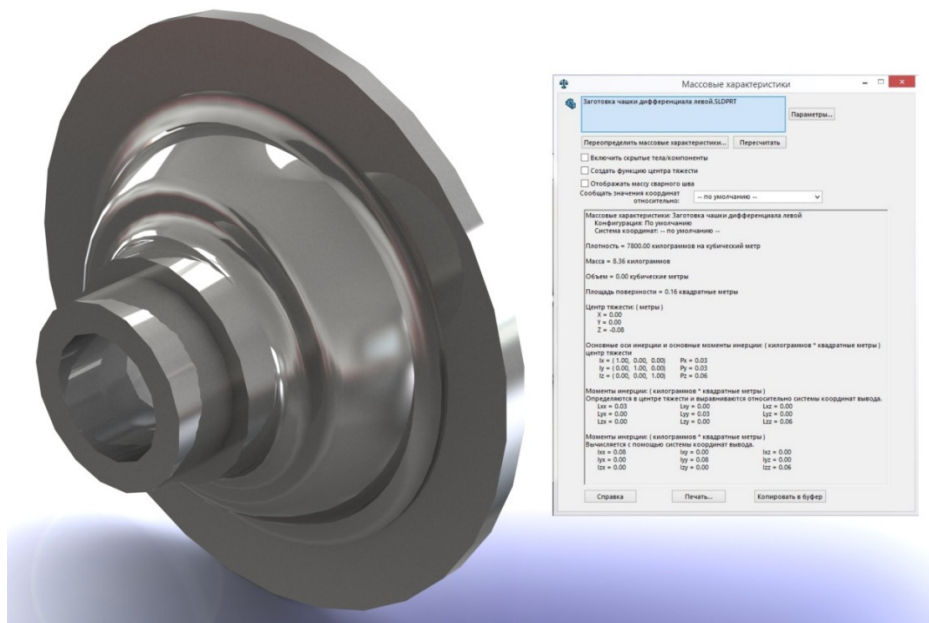


Рис. 3. Массовые характеристики поковки

Считая значение нормативного коэффициента использования материала равным $K_{ИМ} = 0,75$, приходим к выводу о том, что при использовании круглого сортового проката деталь не технологична ($0,20 < 0,75$), а при использовании поковки – технологична ($0,79 > 0,75$).

В соответствии с проанализированными факторами, наиболее рациональной заготовкой будет поковка, выполненная горячей объемной штамповкой на горизонтально-ковочной машине. Проектирование поковки заключается в назначении допусков и припусков на механическую обработку в соот-

ветствии с ГОСТ 7505-89. В ходе оценки технологичности были выявлены поверхности, которые будут отсутствовать в заготовке. Их исключение связано с невозможностью создания поверхностей в заготовке из-за сложной геометрии или малых размеров, а также конструктивное и технологическое упрощение заготовки для снижения брака (рис. 5).

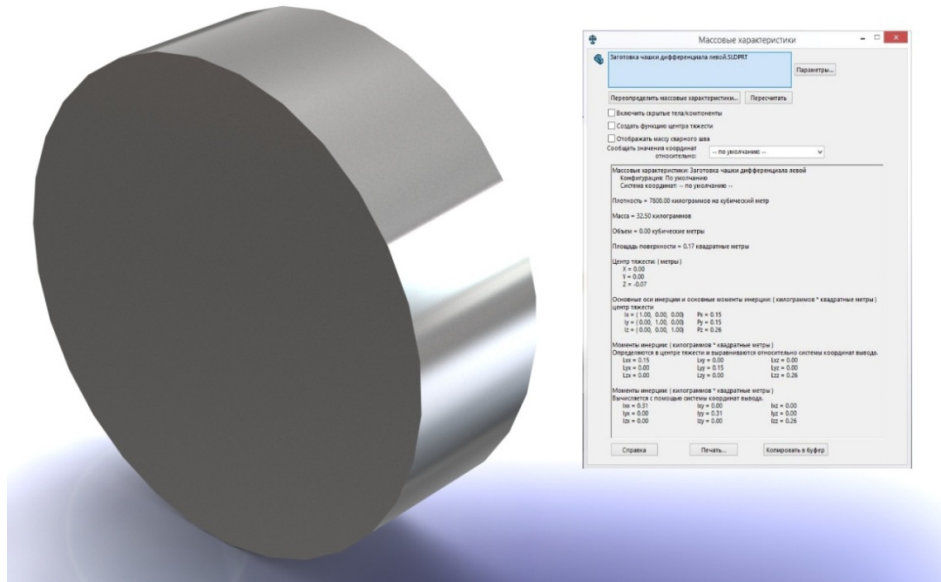


Рис. 4. Массовые характеристики круглого сортового проката

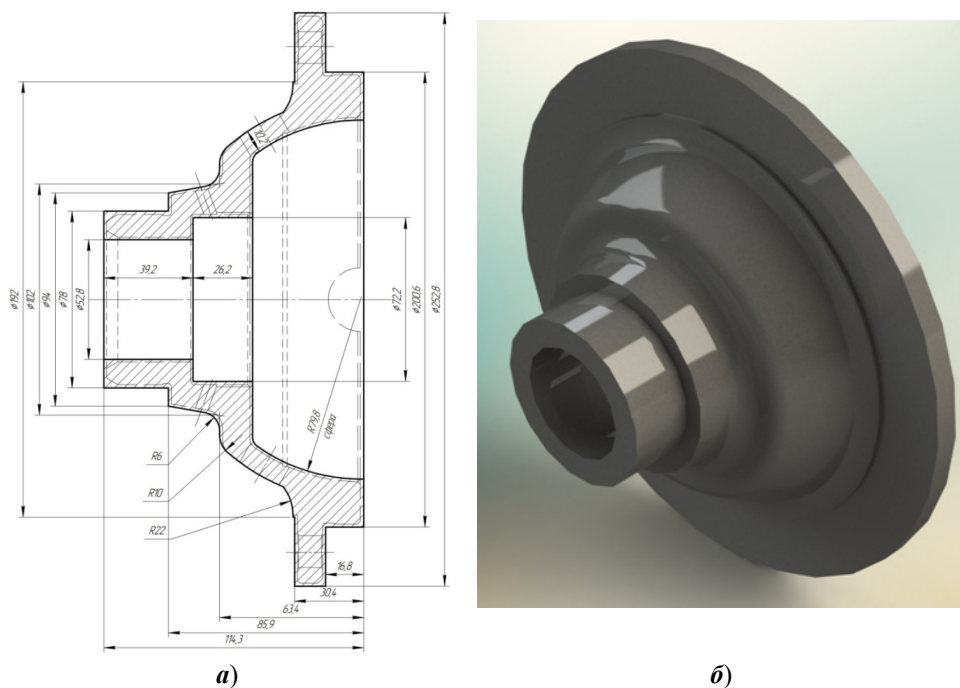


Рис. 5. Эскиз заготовки с назначенными размерами (а) и 3D-модель заготовки (б)

3. Выбор материала

С целью обоснования выбора нового материала детали 130-2403020-2 были проведены исследования технологичности конструкции, выполняемости геометрических и достижимости точностных параметров, обрабатываемости резанием, выполняемости остальных требований по ОСТ 95227-92.

При решении задачи выбора рассматривались следующие материалы: МСт.6 ГОСТ 380–50, сталь 45 ГОСТ 1050–2013, сталь 60 ГОСТ 1050–2013, чугун СЧ15 ГОСТ 1412–85, чугун СЧ30 ГОСТ 1412–85, алюминий АК7 ГОСТ 1583–93, латунь Л60 ГОСТ 15527–2004, пластик ABS 2020-31 ТУ 2214-019-00203521–96 с характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства материалов

Наименование материала	Механические свойства, не менее					
	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Модуль упругости E , ГПа	Твердость, НВ
МСт.6	510	730	19	–	200	–
Сталь 45	580	750	19	42	200	170
Сталь 60	660	850	20	58	174–204	370–450
СЧ15	–	150	–	–	700–1100	163–229
СЧ30	–	300	–	–	1200–1450	187–255
АК7	–	167	1	–	–	50
Л60	–	650	2–4	–	–	165
ABS 2020-31	38,2	–	22	–	2	–

4. Оценка прочности и жесткости

В модуле SolidWorks Simulation [1] был произведен анализ прочности и жесткости детали 130-2403020-2, изготовленной из всех приведенных в табл. 1 материалов. В библиотеке материалов SolidWorks отсутствуют стали МСт.6, стали 45 и стали 60, поэтому, основываясь на представленных в табл. 1 данных, были созданы пользовательские материалы. В результате компьютерного моделирования были определены максимальные значения напряжений, максимальные перемещения, максимальная деформация, минимальный запас прочности для каждого расчетного случая.

Результаты моделирования представлены в табл. 2.

В результате проведенного исследования было выявлено, что изготовление этой детали допустимо только из сталей, приведенных в табл. 2. В ходе оценки других параметров был выбран наиболее дешевый материал – Сталь 45 ГОСТ 1050–2013, который имеет наиболее близкие характеристики, относительно изначального материала МСт.6 ГОСТ 380–50.

Заключение

Результаты исследований влияния материала, формы, габаритных размеров, массы, технических требований к детали, объема и серийности выпус-

ка, коэффициента использования материала позволили рекомендовать для изготовления детали 130-2403020-2 сталь 45 ГОСТ 1050–2013, заготовку-поковку выполнять горячей объемной штамповкой на горизонтально-ковочной машине.

Таблица 2

Результаты моделирования

Наименование материала	Максимальное напряжение, МПа	Максимальное перемещение, мкм	Минимальный запас прочности
Сталь 45	580	96	1,416
Сталь 60	660	96	1,611
СЧ15	101	247	0,246
СЧ30	226	165	0,522
Л60	200	210	0,485
ABS 2020-31	38,2	10817	–

Библиографический список

1. **Землянов, Г. С.** 3D-моделирование / Г. С. Землянов, В. В. Ермолаева // Молодой ученый. – 2015. – № 11. – С. 186–189. – URL: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (дата обращения: 10.03.2020).

References

1. Zemlyanov G. S., Yermolayeva V. V. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2015, no. 11, pp. 186–189. Available at: <https://moluch.ru/archive/91/18642/> (accessed Mar. 10, 2020). [In Russian]

Иванова Татьяна Николаевна

доктор технических наук, профессор,
Институт механики, Удмуртский
федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской
академии наук (Россия, г. Ижевск,
ул. им. Татьяны Барамзиной, 34);
кафедра автоматизации,
информационных и инженерных
технологий, Чайковский филиал
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета (Россия, Пермский край,
г. Чайковский, ул. Ленина 73)

E-mail: reg078829@mail.ru

Ратников Иван Андреевич

магистрант, Ижевский государственный
технический университет имени
М. Т. Калашникова (Россия, г. Ижевск,
Ул. Студенческая, 7)

E-mail: ratnicov97@mail.ru

Ivanova Tatyana Nikolaevna

Doctor of engineering sciences, professor,
Institute of Mechanics, Udmurt Federal
Research Center, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences
(34, Tatyany Baramzinoy street, Izhevsk,
Russia); sub-department of automation,
information and engineering technologies,
Chaykovsky branch of Perm National
Research Polytechnic University
(73, Lenina street, Chaykovsky,
Perm Krai, Russia)

Ratnikov Ivan Andreevich

Master's degree student, Kalashnikov
Izhevsk State Technical University
(7, Studencheskaya street, Izhevsk, Russia)

Муйземнек Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muiyzemnek@yandex.ru

Muiyzemnek Aleksandr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40, Krasnaya
street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Иванова, Т. Н. Совершенствование методов решения типовых конструкторских и технологических задач путем применения компьютерного моделирования / Т. Н. Иванова, И. А. Ратников, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 103–112. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-1-10.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата A4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полупетельный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные специальности журнала:

05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

05.02.08 Технология машиностроения

05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении

05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)

05.11.14 Технология приборостроения

05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата «____» _____ 20__ г.