

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Обеспечение сквозного WorkFlow-процесса в разноплатформенных системах управления жизненным циклом изделия	
А.В. Бредихин, С.Л. Подвальный, Ю.М. Школьников.....	5
Исследование процесса конструирования синтетического изображения лучшего качества на основе серии снимков	
О.А. Пахомова, О.Я. Кравец, О.В. Авсеева.....	9
Алгоритм терминально-оптимального управления беспилотным летательным аппаратом	
Н.Я. Половинчук, С.В. Иванов, В.И. Тимофеев	13
Задача выбора битовых скоростей медиапоток	
А.А. Рогов, Р.В. Воронов, Е.А. Петров.....	18
Математическое описание профиля шероховатости изделий кросс-структурными функциями и моделями динамического прогнозирования	
Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, В.Н. Шапошников.....	22

Энергетика

Создание параметрической замкнутой оптимизационной математической модели рабочего колеса центробежного насоса на платформе ANSYS WORKBENCH	
Ю.А. Булыгин, А.В. Иванов, Д.Н. Галдин.....	29
Синтез оптимальной структуры энергетической системы перспективной гидравлической установки	
С.И. Золотухин.....	33
Возможности использования в автоматизированной системе управления электроснабжением промышленных предприятий тиристорных конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности	
В.Н. Крысанов, К.В. Иванов.....	40
Оценка температурного режима полимерных отделочных материалов во время пожара	
А.М. Чуйков, А.В. Жучков, А.В. Мещеряков, В.И. Лукьяненко, А.В. Бараков.....	46
Влияние геометрических характеристик трубного пучка на основные параметры воздухоохлаждаемых теплообменников с учётом нестационарных режимов их работы	
С.В. Дахин, И.Г. Дроздов, В.И. Ряжских.....	50
Моделирование распределения тепловых потоков при нагреве и охлаждении блока с разветвленной поверхностью	
В.М. Зароченцев, Т.В. Кондратенко, А.К. Макоева.....	57
Исследование и прогнозирование газодинамических параметров потока камер сгорания авиационных ГТД	
А.Е. Кишалов, К.В. Маркина.....	60

Радиотехника и связь

Использование вынужденной конвергенции для снижения сложности LDPC-декодирования	
А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова.....	69
Верификация LDPC-кодов	
Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков, М.В. Хорошайлова, О.Н. Чирков.....	74

Отрицание мажоритарного мультиплексора С.Ф. Тюрин	78
Анализ диаграмм направленности кольцевой антенной решетки с учетом количества элементов и влияния носителя Л.А. Носова, Ю.Г. Пастернак, А.С. Самодуров	84
Исследование морфологии алюминиевой металлизации на контактных площадках кристалла ПЛИС Е.В. Гончаренко, Т.Г. Меньшикова, М.В. Гречкина, Е.Н. Бормонтов	90
Рефлективный анализ возможностей и основных конструктивно-технических характеристик антенн дифракционного излучения на основе периодических замедляющих структур Д.Ю. Крюков, А.В. Останков	95
Задача Ляпунова применительно к параметрическому контуру с периодическими параметрами Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кривцов	104
<i>Машиностроение и машиноведение</i>	
Параметры процесса обработки проволочным электродом с учетом действия автоколебаний инструмента В.В. Золотарев, В.П. Смоленцев	110

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СКВОЗНОГО WORKFLOW-ПРОЦЕССА В РАЗНОПЛАТФОРМЕННЫХ
СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЯ**

А.В. Бредихин, С.Л. Подвальный, Ю.М. Школьников

В статье рассмотрены проблемы создания сквозных автоматизированных рабочих процессов в рамках разных информационных систем. На данный момент отсутствует единый стандарт описания workflow-процессов, что осложняет разработку интеграционных решений между разноплатформенными PLM-системами. Производственный процесс технически сложных изделий предусматривает широкую кооперацию. При использовании кооперантами разных PLM-систем рабочие процессы имеют точку разрыва на границе каждой из них. Существующие программные интеграции решают вопрос передачи инженерных данных, электронной технической документации. В работе рассмотрены вопросы создания сквозного Workflow-процесса на основе применения формата XML. Предложена структура с описанием ключевых данных. Приведены примеры описания отдельных элементов и вид файла XML, описывающего их. Сделан вывод о необходимости создания спецификации XML для передачи информации о бизнес-процессах в рамках различных информационных систем поддержки жизненного цикла изделия, что в свою очередь позволит проводить согласованную работу и принимать качественные управленческие решения. Предложенная методика информационного обеспечения интеграции на уровне workflow позволит перейти на качественно новый уровень взаимодействия между предприятиями, обеспечивая создания сквозного рабочего процесса разработки и производства изделия

Ключевые слова: workflow, PLM, автоматизация рабочих процессов

Введение. В процессе проектирования и изготовления технически сложной техники широко применяется производственная кооперация. Каждый из участников процесса обладает своими особенностями в организации производственной деятельности. Информационные системы, применяемые в проектировании, также могут быть различны. В тоже время, на определённом этапе производства, данные должны быть объединены в единую систему. Существует ряд решений и технологий по интеграции различных систем, как правило, путем взаимной передачи инженерных данных. С целью организации бесшовного производственного процесса ставится задача обеспечения сквозных процедур согласования и выпуска изменений.

В информационных системах управления технической подготовки производства для автоматизации рабочих процессов применяется технология workflow. Бизнес-процессы представляются как последовательность выполняемых действий, операций над информационными объектами со стороны конечных пользователей, либо самой информационной системой и направленные на достижение заранее определенной бизнес-цели. В качестве языка описания используется два типа: WF-язык, разработанный для конкретной WF –системы и WF-

язык, разработанный некой группой как стандарт для реализации в целом классе WF -систем.

Постановка задачи. В основе большинства WF- языков (как стартовая точка разработки концепции языка) лежит одна из двух хорошо известных математических теорий: теория сетей и “Picalculus”-концепция [1].

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный мультиграф, состоящий из вершин двух типов — позиций и переходов, соединённых между собой дугами. Вершины одного типа не могут быть соединены непосредственно. В позициях могут размещаться метки (маркеры), способные перемещаться по сети.

Событием называют срабатывание перехода, при котором метки из входных позиций этого перехода перемещаются в выходные позиции. События происходят мгновенно, либо одновременно, при выполнении некоторых условий. Для описания WF-систем использовать концепцию сетей Петри в явном виде неудобно, так как графическая нотация сетей Петри не является интуитивно понятной (бизнес-аналитикам, а тем более менеджерам с ней сложно работать) и, кроме того, не все виды WF-процессов можно описать с ее помощью.

Концепция Picalculus (π -исчисление) была разработана в конце 80-х годов XX века Робинот Милнером и основана на алгебре параллельных процессов. В отличие от сетей Петри, математическими объектами - π -исчисления являются не графы, а выражения над элементами специальных множеств и преобразования над этими выражениями. В настоящее время π -исчисление является перспективной, но еще очень молодой и развивающейся

Бредихин Алексей Вячеславович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: maurochta@yandex.ru
Подвальный Семен Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: spodvalny@yandex.ru
Школьников Юлия Михайловна – ВГТУ, аспирант, e-mail: chjulia@list.ru

ся теорией, в ней еще очень много открытых вопросов и нерешенных проблем.

Использование workflow широко востребовано, развивается активно, но не централизовано. Единого языкового стандарта описания в данный момент не создано. Многие WF системы не совместимы, используют разные терминологии. Работы в этом направлении ведутся различными международными сообществами. Наиболее успешными считаются следующие предложенные стандарты:

- Workflow reference model
- Workflow Management Facility Specification
- Business Process Specification Schema - BPSS (Electronic Business XML - ebXML)
- Business Transaction Protocol - BTP (OASIS).

- Web Services Conversation Language - WSCL (Web Services Choreography Interface - WSCI (SUN/BEA/W3C)
- Process Specification Language - PSL (National Institute of Standards and Technology, USA).
- Business Process Definition Metamodel (OMG).

Возвращаясь к задаче создания сквозного WF процесса, при интеграции информационных систем мы исходим из существующего состояния отсутствия единого подхода к описанию и реализации технологии workflow. В связи с этим, необходимо определить точки «склейки», набор передаваемой информации в рамках единого процесса и формат данных [2-6].



Рис. 1. Схема интеграции WF процессов

Рассмотрим пример интеграции PLM систем Teamcenter, 1C, Лощман. Каждая из систем обладает встроенным инструментарием автоматизации рабочих процессов. На рис. 2 показаны примеры графического представления workflow.

Для обеспечения «склейки» двух процессов необходимо создать для каждой из систем свой модуль (handler), обрабатывающий информацию о процессе. Данный модуль должен запускаться автоматически в рамках определенного этапа рабочего процесса. Информация передается в заранее определенном формате XML.

Передаваемый рабочий процесс в информационной системе №1 переходит в состояние ожидания, до момента подтверждения завершения или передачи дополнительной информации со стороны информационной системы №2.

Формат XML для передачи процессов имеет структуру с описанием ключевых данных. Среди них выделяем следующие:

- Информационные объекты, вовлеченные в процесс;

- Текущее состояние процесса;
- Отношения между информационными объектами в процессе;

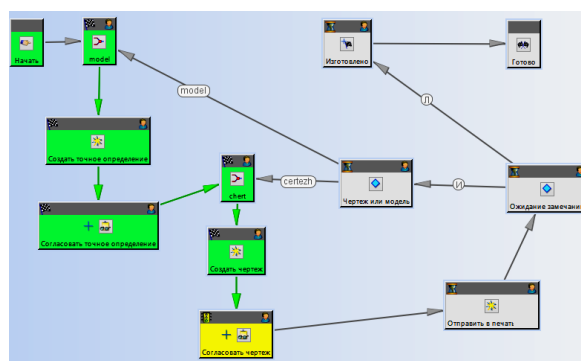


Рис. 2. Графическое представление Workflow

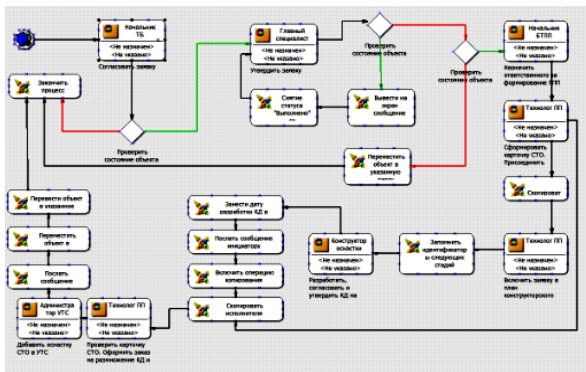


Рис. 2. Графическое представление Workflow (продолжение)

- История рабочего процесса в виде отчета;
- Дата перехода из одной системы в другую;
- Имя (идентификатор) процесса входящего в другой информационной системе.

Примером описания отдельных элементов может быть следующий вид XML.

```
<xsd:element name="Product" type="plm:Product
Type" substitutionGroup="plm:Structure"/>
<xsd:element name="ReleaseStatus" type="plm:R
eleaseSta-
tusType" substitutionGroup="plm:AttribOwner"/>
<xsd:element name="WorkflowProcess" type="pl
m:WorkflowProcessType" substitutionGroup="pl
m:AttribOwner"/>
<xsd:simpleType name="WorkflowTemplateUnd
ecidedReviewersEnum">
  <xsd:annotation>
    <xsd:documentation>
      </xsd:documentation>
    </xsd:annotation>
    <xsd:restriction base="xsd:NMTOKEN">
      <xsd:enumeration value="true"/>
      <xsd:enumeration value="false"/>
    </xsd:restriction>
  </xsd:simpleType>
```

Воронежский государственный технический университет

SOFTWARE THROUGH WORKFLOW PROCESS SYSTEMS MULTIVENDOR PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT

A.V. Bredikhin, Ph.D., assistant professor of computer intelligent design technologies, Voronezh state technical university, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bredihin_av@dmsolution.ru

S.L. Podvalny, Doctor of technical sciences, Full professor, Head of department, Voronezh state technical university, Voronezh, Russian Federation, e-mail: spodvalny@yandex.ru

Ju.M. Shkolnikova, postgraduate, Voronezh state technical university, Voronezh, Russian Federation, e-mail: chjulia@list.ru.

Заключение. Создание спецификации xml для передачи информации о процессе и его состоянии позволяет разработать модули интеграции в рамках различных информационных систем поддержки жизненного цикла изделия. Обеспечить единый процесс работы над проектом для кооперантов, использующих различные информационные системы. Получение достоверной информации о состоянии бизнес задач в системе технической подготовки производства в целом позволяет проводить согласованную работу, принятие качественных управленческих решений, повышая уровень производственной культуры.

Литература

1. Михеев А. Война стандартов в мире Workflow [Текст] / А. Михеев, М. Орлов. Консалтинговая группа Руна. www.runa.ru
2. Особенности согласования документов с применением информационных систем управления данными [Текст] / А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Е.А. Дмитриева, Г.П. Цапко // Вестник науки Сибири. - 2012. - №5 (6).
3. Организация подготовки производства с помощью PDM- системы Teamcenter [Текст] / В.Г. Смелов, В.В. Кокарева, А.Н. Малыхин, О.Н. Малыгина // Известия Самарского научного центра РАН. - 2013. - №6-4.
4. Хаймович, И. Н. Разработка принципов построения бизнес-процессов конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей [Текст] / И.Н. Хаймович// Фундаментальные исследования. -2014. -№9-8.
5. Юров, А.Н. Использование программных интерфейсов API для разработки подсистем САПР [Текст] / А.Н. Юров, В.А. Рыжков, М.В. Паринов // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV международной научно-методической конференции. - 2015.
6. Подвальный, С.Л. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев// Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 56. - № 2-1. - С. 169-173

In article the problems of creation of the through automated workings processes are considered within the framework of the different informative systems. The single standard of description of workflow processes absents now, that complicates development of integration decisions between the different platforms systems. The production process of technical difficult wares foresees wide co-operation. At the use of cooperants of the different PLM systems workings processes have a point of break on a border to each of them. Existent programmatic integrations decide the question of communication of engineerings data, to the electronic technical document. Work examines questions of the creation of through WorkFlow process on the basis of the application of the size XML. Structure with the description of key data is proposed. Examples of the description of separate elements and form of the file of that describing XML, them are given. Is made conclusion about the need of creating the specification XML for the transmission of information about the business- processes within the framework of different information systems of the support of the life cycle of article, which in turn, will make it possible to perform the matched work and to make qualitative administrative decisions. Offered method of the informative providing of integration at level workflow will allow to pass to the high-quality new level of co-operation between enterprises, providing creations of through working development and production of good process

Key words: workflow, PLM, workflow automation

References

1. Miheev A. Voina standartov v mire Workflow [War standards in the world of Workflow]/A. Miheev, M. Orlov. Consulting group Runa. www.runa.ru
2. Vichyugova A.A., Vichyugov V.N., Dmitrieva E.A., Tsapko G.P. Osobennosti soglasovania dokumentov s primeneniem informacionnih system upravleniya dannimi [Features of matching documents with the use of information systems management] // Announcer of science of Siberia . 2012. №5 (6).
3. Smelov V.G., Kokareva V.V., Malyhin A.N., Malyhina O.N. Organizatsia podgotovki proizvodstva s pomoshu PDM-sistemi Teamcenter [Organization of production preparation with the help of PDM - system Teamcenter]// News of the Samara scientific center RAN. 2013. №6-4.
4. Himovich I. N. Razrabotka principov postroeniya biznes-processov konstruktorsko-tehnologicheskoi podgotovki proizvodstva na osnove informacionno-tehnologicheskikh modelei [The development of the principles of business processes design and technological preparation of production based on information technology models]// Fundamental researches. 2014. №9-8.
5. Yurov A.N., Ryzhkov V.A., Parinov M.V. Ispolzovanie programmnih interfeisov API dlia razrabotki podsistem SAPR [The use of a software in interface API for developing subsystems of CAD] // Informatics: problems, methodology, technologies are materials of the XV international scientific-methodical conference. 2015.
6. Podvalny S.L., Vasilev E. M. Model of multialternative management and decision-making in complex systems // Syst. Upravl. Inform. Technol . – 2014. – T. 56. - No. 2-1. - S. 169-173

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНСТРУИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЛУЧШЕГО КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ СЕРИИ СНИМКОВ

О.А. Пахомова, О.Я. Кравец, О.В. Авсева

Определен алгоритм получения лучшего кадра из серии последовательно сделанных снимков динамического объекта, который заключается в следующем: формировании нового метода сегментации на основе имеющихся и применении его к каждому кадру, оценке качества по каждому сегменту, масштабировании и в итоге конструировании искусственного изображения на основе лучших сегментов. Рассмотрены некоторые популярные методы проведения сегментации, а именно методы водораздела, выделения краев и оригинальный метод квантилей. Выделены недостатки и достоинства в использовании того или иного метода. Приведены формулы, позволяющие рассчитать оценку качества изображения. Для обеспечения возможности провести процесс масштабирования с максимальной точностью в рассмотренную задачу было включено допущение о равномерной скорости движения наблюдаемого объекта. Таким образом, определена формула для масштабирования изображения, а также сделаны выводы о возможных трудностях построения нового изображения на основе выделенных сегментов. Основной проблемой в данном случае является необходимость выработать новый алгоритм сегментирования изображения, позволяющий сочетать достоинства других и решить поставленную задачу получения синтетического изображения

Ключевые слова: сегментация, обработка изображения, оценка качества, синтетическое изображение, распознавание

Введение

В настоящее время существует большое количество систем распознавания, позволяющих идентифицировать объект в условиях плохой освещенности, под большим углом или же при малом разрешении кадра. Однако практически любая из них не способна выдать хороший результат, если ни на одном из снимков нет четкого представления объекта. Представим серию снимков одного и того же объекта, где на каждом из них видна только его какая-то часть, все остальное засвечено. В подобной ситуации возникает проблема получения верного результата распознавания.

Постановка задачи

Целью исследования является рассмотрение процесса создания синтетического, нового изображения на основе серии последовательно сделанных кадров динамического объекта с целью создания препроцессора для системы распознавания.

В рамках данного исследования предполагается работа с монохромным изображением, поскольку большинство современных видеокамер машинного зрения работают именно в таком режиме видеосъемки. Это связано, прежде всего, с тем, что при большой скорости передачи видеоинформации существует необходимость в повышении пропускной способности канала связи без потери качества изображения.

Предполагается следующий алгоритм работы:

1. Проведение сегментации по каждому кадру.
2. Оценка качества всех сегментов.
3. Масштабирование всех сегментов
4. Конструирование синтетического изображения на основе лучших сегментов.

Под сегментацией можно понимать процесс разбиения изображения на ряд частей со схожими характеристиками, такими как яркость, цвет, текстура, форма. Результатом является множество областей, которые полностью покрывают исходное изображение. Причем каждая область соответствует реальному объекту, или его частям, а границы соответствуют границам объектов. Существует большое количество методов для определения схожих характеристик пикселей, с помощью которых можно разделить изображение на части. Однако универсального решения для данной задачи не существует, поэтому необходимо использовать комбинированный подход.

Таким образом, на начальном этапе решения задачи построения синтетического изображения главной сложностью является создание нового алгоритма сегментирования, который сочетал бы в себе преимущества других методов.

Сегментирование по каждому кадру

Одним из наиболее популярных методов разбиения изображения по схожим признакам является сегментирование преобразованием водораздела (рис. 1). Его суть состоит в рассмотрении изображения как некоторой карты местности, где значения яркостей представляют собой значения высот относительно некоторого уровня[1]. Применение этого метода сегментации изображений эффективно преодолевает проблему чрезмерной сегментации и дает удовлетворительные результаты.

Пахомова Олеся Анатольевна – ВГТУ, аспирант, e-mail: olesja555@list.ru

Кравец Олег Яковлевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: csit@bk.ru

Авсева Ольга Владимировна – ВГУИТ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: olga-avseeva@mail.ru

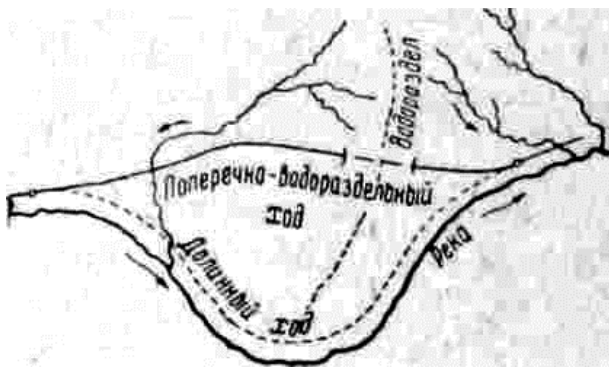


Рис. 1. Метод водораздела

Другой известный метод проведения сегментирования – метод выделения краев, основанный на вычислении двумерного пространственного градиента и выявлении областей соответствующим краям объекта. Данный подход играет важную роль в анализе изображений и распознавании образов и является основой для многих других методов сегментации [1].

Результатом выделения границ является набор связанных кривых, обозначающих границы объектов, граней и отрисов на поверхности, а также кривые, которые отображают изменения положения поверхностей. Объекты состоят из многочисленных частей различных цветных уровней.

Перепад яркости – это связанное множество пикселей, лежащих на границе между двумя областями (рис. 2)

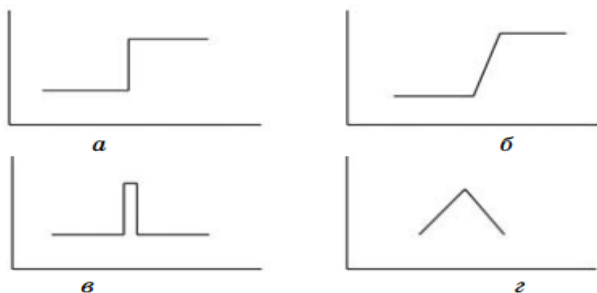


Рис. 2. Типы краев: а – край шага; б – край ската; в – край линии; г – край крыши

Выделение краев происходит за 3 этапа:

1. Фильтрация шума - операция, имеющая своим результатом изображение того же размера, полученное из исходного по некоторым правилам.

2. Улучшение - определение изменения в интенсивности в соседней точке (вычисление градиента для пикселей изображения).

3. Выделение - определение точек, являющихся краями.

Приведем пример реализации оригинального метода квантилей, который был впервые описан в работе [1]. Он предполагает, что яркость любого пикселя объекта на изображении выше, чем яркость любого пикселя фона. Алгоритм работы предполагает упорядочивание всех пикселей изображения по убыванию яркости. Причем пиксели, принадлежащие проекции объекта,

располагаются в начале упорядоченной последовательности.

Рассмотрим серию последовательно сделанных кадров, на которых движутся несколько транспортных средств (рис. 3).

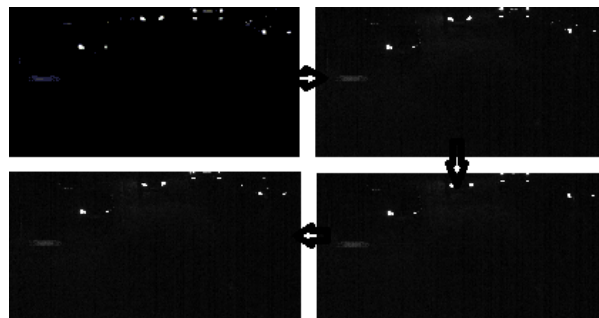


Рис. 3. Серия кадров движущихся транспортных средств

Затем пример сегментирования одного из изображений методом квантилей (рис. 4).



Рис. 4. Реализация сегментации методом квантилей

Оценка качества частей изображений

После завершения процесса сегментации необходимо провести оценку качества по каждому из сегментов. Существует два подхода, позволяющих решить данную проблему: количественная оценка с помощью использования математических методов и субъективная оценка на основе экспертных оценок [2]. В рамках данного исследования наиболее интересен первый способ, поскольку процесс создания лучшего кадра будет проведен без участия человека, в автоматическом режиме.

Количественные оценки подразделяют на абсолютные, вычисляемые по каждому изображению в отдельности, и сравнительные. Причем сравнительная мера является числовым результатом сравнения двух или более изображений. Для сравнения также можно использовать абсолютные меры, вычисленные для каждого изображения по отдельности.

Рассмотрим некоторые из оценок.

1. Абсолютная оценка резкости изображения - это степень размытости границы между двумя соседними участками изображения с разной оптической плотностью.

Меру резкости изображения S можно определить нахождением угла наклона профиля яркости изображения на границе перепада с помощью следующей формулы:

$$S_i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{G}{W} \quad (1)$$

где i – количество краевых пикселей на изображении, W – ширина перепада, G – разница между значениями яркости пикселей, обозначенных a и b (рис 5).

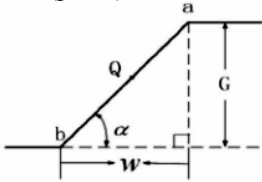


Рис. 5. Определение меры резкости изображения

2. Сравнительная оценка резкости изображения определяется как мера эксцесса двумерного спектра Фурье по следующему алгоритму:

2.1. Выделение прямоугольной области на изображении.

2.2. Преобразование полученной области в частотную.

2.3. Вычисление меры эксцесса по формуле:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma_4} \quad (2)$$

где μ_4 – четвертый центральный момент, σ – стандартное отклонение.

Абсолютная оценка контрастности – градиционная характеристика изображения по различию в светлоте (насыщенности цвета) его наиболее ярких и наиболее темных участков.

Пиксели для сравнения можно выбирать различными способами. Причем наиболее простой способ – это сравнить соседние пиксели в горизонтальном и вертикальном направлении.

Все элементы считаются равнозначными, и контраст каждой пары определяется по формуле:

$$C_{ij} = \frac{L_i - L_j}{L_i + L_j} \quad (3)$$

где L_i, L_j – яркости элементов изображения.

Затем применяют правило суммирования контрастов. Вычисление суммарного контраста проводят с помощью усреднения матрицы локальных контрастов.

Масштабирование изображений

В рамках данной задачи предполагается, что объект движется с равномерной скоростью. Такое допущение позволит обеспечить возможность провести процесс масштабирования с максимальной точностью.

Под масштабированием понимают искусственное изменение разрешения изображения. В данном случае речь идет об увеличении или уменьшении конкретного сегмента с целью конструирования из различных частей единого объекта [3].

Как правило, для сравнения изображений X и Y используется формула, являющаяся суммой модулей или квадратов разностей интенсивности:

$$d(X, Y) = \sum (X[i, j] - Y[i, j])^2 \quad (4)$$

Однако, при таких больших объемах вычислений, которые планируются в решении рассматриваемой задачи, данный подход не подойдет из-за чрезмерных временных и ресурсных затрат. Поскольку помимо простого сравнения изображений существует проблема обнаружения одного фрагмента изображения на другом, обратим внимание на другой метод, использующий преобразование Фурье для расчёта меры совпадения двух изображений при различных смещениях их между собой.

Прямое преобразование:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (5)$$

$k=0, \dots, N-1$

Обратное преобразование:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k * e^{\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (6)$$

$n=0, \dots, N-1$.

Вывод

В данной статье была рассмотрена актуальная проблема большинства систем распознавания, связанная с невозможностью выдать успешный результат из-за отсутствия четкого представления об объекте наблюдения, и сформулировано возможное ее решение путем создания синтетического изображения на основе серии снимков.

Были рассмотрены некоторые методы проведения процесса разбиения изображения на части со схожими признаками и оценки качества по каждому конкретному сегменту, а также процесс масштабирования изображения.

Основная сложность проведения процесса получения лучшего кадра – правильно подобрать механизм сегментации изображения, поскольку универсальный метод отсутствует и необходимо использовать комбинированный подход.

Новизна данной исследовательской работы состоит в том, что роль лучшего кадра выполняет не один из серии кадров, как это реализовано во многих системах обработки видеoinформации, а новый, искусственно созданный из специально отобранных частей изображения.

Литература

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur / X. Wang, B. Tian, C. Liang, D. Shi // Congress on Image and Signal Processing, 2008 – 470 с.
3. Дмитриев, А.Л. Оптические методы обработки информации [Текст]: учеб. пособие / А.Л. Дмитриев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 46 с.

Воронежский государственный технический университет

Воронежский государственный университет инженерных технологий

RESEARCH OF DESIGN PROCESS SYNTHETIC IMAGE THE HIGHEST QUALITY ON THE BASIS OF SERIES OF SNAPSHOTS

O.A. Pakhomova, assistant, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,
e-mail: olesja555@list.ru

O.Ja. Kravets, doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh,
Russian Federation, e-mail: csit@bk.ru

O.V. Avseeva, assistant professor of Technical Sciences, Voronezh State University of Engineering
Technologies, Russian Federation, e-mail: olga-avseeva@mail.ru

The algorithm of obtaining the best frame from a series of consecutive shots of a dynamic object is defined which is the following is discusses some of the popular methods of segmentation, evaluation of image quality and zoom and, as a result, the construction of an artificial image based on the best segments.

Certain popular methods of segmentation, namely the methods of the watershed, edge detection and an original method of quantile. The advantages and disadvantages in the use of a particular method are identified. Some popular methods of segmentation, namely the methods of the watershed, edge detection and an original method of quantile are considered. Formulas allowing calculating the estimate of the image quality are detected. Advantages and disadvantages in the use of a particular method are identified. The assumption of a uniform velocity of the observed object was included in the consideration of the problem to allow holding the zoom process with maximum precision.

Thus, the formula for scaling images is detected. Conclusions about the possible difficulties of building a new image based on the selected segments are produced. The main problem in this case is the need to develop a new algorithm for image segmentation, which allows to combine the advantages of others, and to solve the problem of synthetic images

Key words: segmentation, image processing, quality assessment, synthetic image recognition

References

1. Gonzalez R., Woods R., Eddins S. Digital Image Processing in Mathcad. Technosphere, Moscow, 2006- 1072 p.
2. Wang X., Tian B., Liang C., Shi D. «Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur //Congress on Image and Signal 2008 Congress on Image and Signal Processing, 2008– 470 p.
3. Dmitriev A. L. Optical information processing methods. Tutorial. SP. SPbSUITMO 2005 – 46 p.

АЛГОРИТМ ТЕРМИНАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Н.Я. Половинчук, С.В. Иванов, В.И. Тимофеев

Одним из направлений совершенствования систем управления высокоманевренными беспилотными летательными аппаратами является формирование управления на конечном участке траектории. Однако точность таких алгоритмов в традиционно используемых системах управления снижается вследствие действия возмущений большого уровня. Это связано с неадекватностью используемых в алгоритмах прогнозирования моделей. Кроме этого их реализация ограничивается вычислительными ресурсами бортовых ЭВМ.

В алгоритмах терминального управления, связанных с прогнозированием будущего движения, присутствуют итерационные процедуры, что при ограниченных возможностях БЦВМ не позволяет существенно увеличивать частоту замыкания контура обратной связи. Это не позволяет компенсировать погрешности многошагового процесса управления, как, например, в случаях управления космическим аппаратом многоразового использования или беспилотным маневрирующим летательным аппаратом.

Поэтому для повышения точности управления в алгоритмах прогнозирования целесообразно использовать максимально адекватные модели управляемого движения ЛА.

В работе рассматривается алгоритм терминально-оптимального управления с прогнозированием будущего движения летательного аппарата, отличающийся от известных тем, что в схеме прогнозирования используется идентифицируемая по набору измерений модель управляемого движения летательного аппарата.

Действие возмущений на различных этапах полета большого уровня, которые являются априорно неопределенными, требуют включения в контур прогнозирования алгоритмов идентификации.

Такой подход позволяет компенсировать ограниченные вычислительные возможности бортовых ЭВМ и повысить точность приземления ЛА в заданную терминальную область.

Рассмотрен практический пример, обосновывающий адекватность выбранной математической модели движения ЛА и работоспособность предложенного алгоритма с результатами моделирования

Ключевые слова: прогнозирование движения, беспилотный летательный аппарат

Введение

Структура системы наведения с учетом высоких требований к вычислительным возможностям бортовых ЭВМ должна обеспечивать, во-первых, устойчивое близкое к оптимальному движение ЛА по требуемой траектории и, во-вторых, достижение конечных условий с заданной точностью. Структура системы наведения, предложенная в [2,7] является двухконтурной и включает:

- короткопериодический контур с тактом реализации алгоритма t_0 ;
- длиннопериодический контур с тактом реализации алгоритма $t_1 = k_D * t_0$.

Прогнозирование будущего движения осуществляется путем интегрирования уравнений модели ЛА, идентифицируемой по всей накопленной измерительной информации $z(t)$.

Постановка задачи. Задача синтеза алгоритма оптимального управления движением ЛА $u(X(t), t)$ формулируется следующим образом.

Движение ЛА описывается системой детерминированных дифференциальных уравнений

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t), u^{\delta}(t), t], \quad t \in [t_0, t_k], \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $f(\cdot)$ – известная вектор-функция (размерности $n \times 1$), переводящей ЛА из фиксированного начального состояния X_0 в заданное конечное,

определяемое соотношением

$$Q(t_k) = 0, \quad \dim(Q) = p, \quad p \leq n. \quad (2)$$

Критерий качества управления $J[X(t), u(t), t]$ формируется с учетом требований к минимуму отклонения текущих фазовых переменных $X_i(t)$ ($i = \overline{1, n_X}$, $n_X < n$), определяющих форму траектории (например, составляющих радиус-вектора ц.м. ЛА), от заданных $X_i^*(t)$, а также исходя из требования минимизации "энергетических" затрат на управление:

$$J[X(t), u(t), t] = \frac{1}{2} \left\{ \int_{t_0}^{t_k} \Delta X(t)^T M_X \Delta X(t) dt + \int_{t_0}^t u(t)^T B u(t) dt \right\}, \quad (3)$$

где M_X , B – диагональные матрицы весовых коэффициентов (за счет матрицы M_X (размерности $n \times n$) учитываются только те элементы вектора состояния, которые определяют форму траектории);

$$\Delta X(t) = X(t) - X^*(t).$$

Второе слагаемое критерия (3) определено как величина, пропорциональная квадрату нормы вектор-функции управления в метрике гильбертова пространства L_2 . Минимизация этой оставляющей позволяет оставить наибольший интегральный запас управляемости ЛА на парирование возмущений.

Половинчук Николай Яковлевич – МГТУ ГА, канд. техн. наук, профессор, e-mail: doozy@yandex.ru
 Иванов Станислав Валерьевич – ДГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: sta399@yandex.ru
 Тимофеев Владимир Игорьевич – ДГТУ, доцент, e-mail: yman9@rambler.ru

Момент t_k приведения ЛА в конечную точку не фиксирован и задан условием

$$\tilde{\Phi}(t_k) = 0, \quad (4)$$

в предположении, что

$$\left. \frac{d\tilde{\Phi}(t)}{dt} \right|_{t=t_k} \neq 0.$$

Конструктивная схема ЛА и требования устойчивости накладывают на вектор-функцию управления ограничения вида

$$u(t) \in U, \quad (5)$$

где U – заданное множество ограниченных кусочно-непрерывных функций.

С математической точки зрения решаемая задача относится к классу краевых экстремальных задач. Для ее решения целесообразно воспользоваться методами синтеза терминально-оптимального управления [3,4].

Расширенный функционал Лагранжа при этом имеет вид:

$$L = J[x(t), t] + \int_{t_0}^{t_k} \tilde{\psi}(F - \dot{X}) dt + (\lambda Q) + \tilde{\lambda} \tilde{\Phi}, \quad (6)$$

где $\tilde{\psi}(t)$ – функциональный множитель Лагранжа для дифференциальной связи (1) (сопряженная вектор-функция, $\dim(\tilde{\psi}) = n$);

$\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p)$ – вектор-строка $1 \times r$ коэффициентов коррекции управления, постоянных в такте "длиннопериодического" контура;

$\tilde{\lambda}$ – скалярный множитель Лагранжа для связи (4).

Вектор коррекции управления $a(T_1)$, являющийся векторным множителем Лагранжа для терминальных условий (2), определяется по результатам прогнозирования в "длиннопериодическом" контуре и обеспечивает совмещение прогнозируемых конечных фазовых переменных ЛА с расчетными. Таким образом осуществляется последовательное оптимальное приближение истинного движения аппарата к расчетному. Причем в каждом такте формирования управляющего воздействия ("на каждой j -й итерации") учитываются терминальные ограничения, что обеспечивает высокую точность синтезируемого управления и позволяет снизить невязки фазовых переменных конечного состояния – снизить нагрузки при коррекции аппарата по результатам прогноза.

Обоснование алгоритма идентификации.

Неопределенность противодействия средств противника определяет стохастический характер процесса функционирования ЛА. Поэтому идентифицируемая модель функционирования ЛА представлена векторным стохастическим нелинейным дифференциальным уравнением со структурной неопределенностью [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dx(\tau)}{d\tau} &= f(x, \tau) + f_0(x, \tau)\xi(\tau), \\ \tau &\in [t_0, NT_1], \quad x(t_0) = x_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где $x(\tau)$ – вектор ($\dim(x) = n_m$) модели функционирования ЛА;

$f(\cdot)$ – идентифицируемая вектор-функция со структурной неопределенностью (размерности $n_m \times 1$);

$f_0(\cdot)$ – известная функция-матрица размерности $n_m \times n_{\text{ш}}$;

$\xi(\tau)$ – случайный процесс ($\dim(\xi) = n_{\text{ш}}$) типа белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и известной матрицей интенсивностей $D_\xi(\tau)$ размерности $n_{\text{ш}} \times n_{\text{ш}}$.

При решении задачи идентификации целесообразно использовать наиболее полные модели функционирования ЛА. Вектор-функции управления u , формировавшиеся в течение полета $T = NT_1 - t_0$, при решении задачи идентификации известны и являются функциями времени.

Навигационный комплекс ЛА позволяет осуществлять наблюдение параметров собственного движения с использованием инерциальных измерителей. Движение ЛА характеризуется резким снижением скорости, выполнением маневров как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, большими пределами изменений поперечных и продольных перегрузок. Поэтому ошибки измерителей носят случайный характер [7] и наблюдение параметров собственного движения ЛА описывается нелинейным алгебраическим стохастическим уравнением

$$z(t) = h(x, t) + \zeta(t), \quad (8)$$

где $z(t)$ – вектор выходных сигналов измерителей параметров движения ЛА ($\dim(z) = q$);

$h(\cdot)$ – известная нелинейная вектор-функция указанных аргументов;

$\zeta(t)$ – q -мерный гауссовский случайный процесс типа белого шума с известной матрицей интенсивностей $D_\zeta(t)$ (размерности $q \times q$) помехи измерений.

Вектор коррекции управления $a(T_1)$, обеспечивающий совмещение прогнозируемых конечных фазовых переменных ЛА с расчетными, определяется в блоке коррекции. Тогда, следуя идеологии алгоритмов оптимально-терминального управления и учитывая краевые условия (2), а также уравнение

$$[Q(t_k)]_j + \int_{t_0}^{t_k} [K_u(t)]_j [\delta u^\delta(t)^T]_j dt = 0, \quad (9)$$

где $[Q(t_k)]_j$ – вектор невязок краевых условий, соответствующих некоторой j -й итерации построения функции оптимального управления $[u^\delta(t)]_j$;

$[\delta u^\delta(t)^T]_j$ – поправка на данной итерации к

$[u^\delta(t)]_j$;

$[K_u(t)]_j$ – градиент в момент t для j -й итерации,

получим систему линейных алгебраических уравнений для определения компонент вектора $a(T_1)$:

$$[W(t_0)]_j a_j^T = B[Q(t_k)]_j, \quad (10)$$

где $[W(t_0)]_j$ матрица эффективности коррекции управления.

С целью обоснования реализуемости и оценки вычислительной эффективности представленного подхода было выполнено численное моделирование следующего практического примера.

Пример. Рассматривался гипотетический беспилотный летательный аппарат, технические характеристики и компоновочная схема которого приведены в работе [4, Приложение 3]. Предполагалось, что ЛА должен осуществить в процессе спуска боковой маневр – уход из плоскости полета на 100м и наведение в заданную терминальную область приземления.

С целью моделирования неопределенности на первом этапе исследований в "реальную" модель функционирования ЛА вводились шумы аэродинамических коэффициентов и моментов, шумы плотности атмосферы Земли и ветра. На втором этапе дополнительно задавалась "неизвестная" структурная неопределенность за счет введения "неопределенной" добавки $\Delta C_y(M)$ аэродинамического коэффициента $C_y(\alpha, M)$ (α – угол атаки, M – число Маха):

$$\Delta C_y(\alpha, M) = \exp(-M). \quad (11)$$

Подобные "неизвестные" отклонения аэродинамических характеристик от расчетных значений могут быть вызваны различными причинами.

В качестве модели навигационного комплекса ЛА использовалась модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы, включающей три акселерометра и три датчика угловой скорости [5]. Модели погрешностей измерителей представлялись белым гауссовским шумом с известными характеристиками.

С целью повышения качества сравнительного анализа были выполнены численные исследования традиционного алгоритма оптимально-терминального управления без процедуры идентификации, а также разработанного алгоритма управления.

Полученные результаты подтвердили, что в условиях структурно-параметрической неопределенности модели функционирования ЛА традиционный алгоритм имеет значительные погрешности. Это обусловлено недостаточностью количества итераций прогнозирования (моделировались четыре итерации) и неадекватностью модели прогнозирования движения. Увеличение количества итераций невозможно вследствие малой продолжительности времени управляемого полета ЛА [1,2].

ВЫВОДЫ

Численные исследования разработанного модифицированного алгоритма оптимально-терминального управления с прогнозированием

идентифицируемой по набору измерений модели функционирования ЛА в то же время показали следующее. Ошибки приведения в заданный район приземления и погрешности обеспечения заданных параметров движения центра масс ЛА вдоль опорной траектории были на 45%-50% меньше по сравнению с ошибками традиционного метода.

Полученные результаты подтвердили, синтезированный алгоритм может быть эффективно использован для управления маневрами ЛА в окрестности опорной траектории, настроенной на крайние условия и заложенной в алгоритм прогнозирования. Результаты моделирования приведены на рис.1-3.

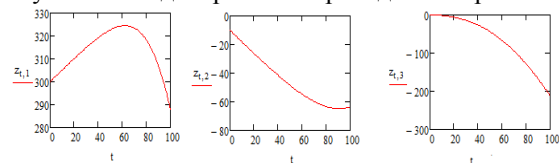


Рис. 1. График линейных скоростей беспилотного ЛА по осям x,y,z, (м/с)

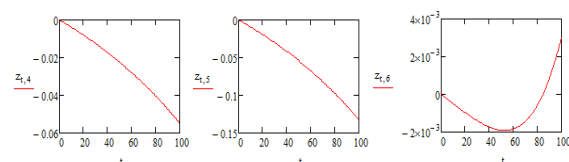


Рис. 2. График угловых скоростей беспилотного ЛА по осям x,y,z, (рад/с)

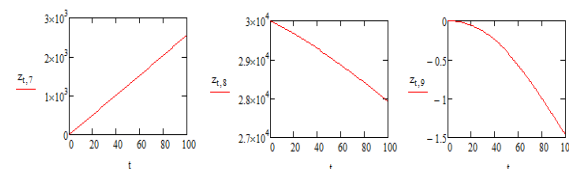


Рис. 3. График координат движения беспилотного ЛА по осям x,y,z, (м)

Литература

1. Охоцимский Д.Е. Алгоритмы управления космическими аппаратами при входе в атмосферу [Текст] / Д.Е. Охоцимский, Ю.Ф. Голубев, Ю.Г. Сихарулидзе. - М.: Наука, 1985. - 400 с.
2. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом [Текст] / В.Н. Буков. - М.: Наука, 1987. - 232 с.
3. Иванов В.П. Синтез управления нелинейными системами на прогнозирующих моделях [Текст]. / В.П. Иванов, С.А.Кабанов // Идентификация динамических систем и обратные задачи: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Суздаль. 1990. - С.61-63.
4. Ваньков А.И. Использование прогнозирующего математического моделирования для управления ориентацией космического аппарата в условиях неопределенности его параметров [Текст]/ А.И. Ваньков // Матем. моделирование. - 1989. - Т.1.- № 9. - С. 121.
5. Справочник по теории автоматического управления [Текст]. / Под ред. А. Красовского. - М.: Наука, 1987. - 712 с.

6. Половинчук Н.Я. Основы теории наведения баллистических ракет и специальных ЛА [Текст]. РВИ РВ, 2011. - С.146-148.

7. Половинчук Н.Я. Оптимальное терминальное управление структурно-неопределенной динамической системой [Текст] / Н.Я. Половинчук, В.Н. Трофименко, С.В.Иванов // Двойные технологии. 2013. - №4. - С.62-64.

8. Щербань И.В. Методика синтеза управления маневром уклонения игрока-союзника в медленном контуре терминальной системы управления [Текст] / И.В.Щербань, С.В.Иванов // Двойные технологии. - 2010. - №1. - С. 43-44.

9. Половинчук Н.Я. Методы и алгоритмы терминального управления движением летательных аппаратов [Текст]: монография / Н.Я. Половинчук, И.В. Щербань.- М.: МОРФ, 2004. - 246 с.

10. Половинчук Н.Я. Проектирование систем управления ракет-носителей и межконтинентальных баллистических раке [Текст]: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Н.Я. Половинчук, А.А. Ардашов.- Ростов-на-Дону: РВИРВ, 2010. – 242 с.

Московский государственный технический университет гражданской авиации (Ростовский филиал)
Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону)

THE ALGORITHM OF TERMINAL-OPTIMAL CONTROL OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

N.Ya. Polovinchuk, Cand. Sc. (Tech), professor, professor of chair of the AERPO of the Rostov Branch of the Moscow state technical university of civil aircraft, Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: doozy@yandex.ru

S.V. Ivanov, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Automation of productions» of the Don state technical university, Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: sta399@yandex.ru

V.I. Timofeev, the senior lecturer of chair «Automation of productions» of the Don state technical university, Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: yman9@rambler.ru

One of directions of perfection of control systems of highly maneuverable unmanned aerial vehicles is the formation control in the terminal phase of the trajectory. However, the accuracy of these algorithms traditionally used in control systems is reduced as a result of the perturbation of a high level. This is due to the inadequacy of the algorithms used in the forecasting models. In addition, their implementation is restricted to computing resources on-board electronic computers.

In the algorithms of terminal control associated with the prediction of the future movements are present iterative procedure that with the limited capability of on-board digital computing machines allows significantly increase the frequency of the circuit feedback loop. It is not possible to compensate for errors of multi-step management process, such as in cases of control spacecraft reusable or unmanned maneuvering aircraft.

Therefore, to improve the control accuracy in the forecasting algorithms, it is advisable to use the most adequate model of the controlled vehicle.

This paper describes the algorithm of terminal optimal control with forecasting the future movement of the aircraft, which distinguishes from the known fact that in the scheme of prediction uses the identified set of dimensions the model of controlled aircraft movement.

The effect of perturbations at different phases of flight at a high level, which are a priori uncertain require inclusion in the outline predict recognition algorithms.

This approach allows us to compensate for the limited computational power on-board electronic computers and to increase the precision landing of aircraft in a given terminal area.

Consider a practical example justifying the adequacy of the chosen mathematical model of the motion of the aircraft and the performance of the proposed algorithm with simulation results

Key words: motion prediction, unmanned aerial vehicle

References

1. Ohocimskiy D.E., Ju.F. Golubev, Ju.G. Sjarulidze. Algoritmy upravleniya kosmicheskimi apparatami pri vhozhdenii v atmosferu [Control algorithms for space vehicles during reentry] // M.: Science.- 1985. – 400 p.
2. Bukov V.N. Adaptivnye prognoziruyushchie sistemy upravleniya poletom [Adaptive predictive flight control system]// M.: Science.- 1987. – 232 p.
3. Ivanov V.P., Kabanov S.A. Sintez upravleniya nelineynymi sistemami na prognoziruyushchih modelyakh [Control synthesis of nonlinear systems on a predictive model] // Suzdal.: Science.- 1990.- 61-63 p.
4. Vankov A.I. Ispolzovanie prognoziruyushchego matematicheskogo modelirovaniya dlya upravleniya orientatsiey kosmicheskogo apparata v usloviyah meopredelennosti ego parametrov [Use of predictive mathematical mod-

elling to control the orientation of the spacecraft in the conditions of uncertainty of its parameters]// Mat. modeling. - 1989. Vol. 1. No. 9. – 121p.

5. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya Pod. red. A. Krasovskogo[Handbook of automatic control theory Ed. by A. Krasovsky]// M.: science.- 1987. - 712 p.

6. Polovinchuk N.Ya. Osnovy teorii navedeniya ballisticheskikh raket i specialnykh LA. [Fundamentals of the guidance theory of the ballistic missiles and special aircraft]// Rostov-on-Don: Rostov High Military school. 2011. - P.146-148.

7. Polovinchuk N.Ya., Trofimenko V.N., Ivanov S.V. Optimalnoe terminalnoe upravlenie strukturno-neopredelennoy dinamicheskoy sistemoy [Optimal terminal control of structural - uncertain dynamic system] // Dual technology. 2013. - No. 4. - P. 62-64.

8. Scherban I.V., Ivanov S.V. Metodika sinteza upravleniya manevrom ukloneniya igroka-soyuznika v medlennom konture terminalnoy sistemy upravleniya [Methodology of control synthesis of the evasiv maneuver of the player-ally in a slow circuit terminal control system] // Dual technology. - 2010. - No. 1. - P. 43-44.

9. Polovinchuk N.Ya., Scherban I.V. Metody i algoritmy terminalnogo upravleniya dvizheniem letatelnykh apparatov [Methods and algorithms of terminal control movement of aircraft]// M.: Ministry of defence of the Russian Federation.- 2004. - 246 p.

10. Polovinchuk N.Ya. Ardashov A.A. Proektirovanie sistem upravleniya raket-nositeley i mejkontinentalnykh ballisticheskikh raket [Design of control systems for carrier rockets and Intercontinental ballistic missiles] // Rostov-on-Don: Rostov High Military school. 2010. – 242 c.

ЗАДАЧА ВЫБОРА БИТОВЫХ СКОРОСТЕЙ МЕДИАПОТОКОВ

А.А. Рогов, Р.В. Воронов, Е.А. Петров

На мультимедийные потоки, передаваемые через Интернет, оказывают влияние различные сетевые помехи, которые могут вызывать проблемы воспроизведения на стороне пользователя, такие как долгий старт воспроизведения и остановки воспроизведения видеопотока. Для предотвращения данных проблем используют вещание с адаптивной битовой скоростью. При использовании данной технологии исходный медиапоток кодируется в медиапоток с различными разрешениями и битовыми скоростями. В данной статье рассмотрена проблема выбора набора формируемых битовых скоростей для передаваемого медиапотока. Формирование набора битовых скоростей в реальном режиме времени является ресурсоемкой задачей и, как правило, набор ограничен не более чем 4-6 битовыми скоростями для одного потока. Выбранный набор позволит получать медиапоток пользователям без задержек в воспроизведении и в максимальном качестве. Для формирования такого набора предложен подход, использующий статистическую информацию, получаемую от медиаплееров пользователей, который учитывает состояние интернет-соединения пользователей, просматривающих данный медиапоток. Для реализации данного подхода требуется решить оптимизационную задачу выбора битовых скоростей медиапотоков. В статье рассмотрен алгоритм решения задачи, основанный на методе динамического программирования

Ключевые слова: электронное обучение, битрейт, мультимедийный поток, MPEG-DASH

Введение

Развитие интернет-технологий оказывает существенное влияние на учебный процесс в образовательных учреждениях, заставляя использовать новые технологии, к которым относятся видео трансляции лекций, семинаров, конференций и других мероприятий. Активное использование видео трансляций, требует организации доставки медиапотоков большому количеству пользователей, имеющих совершенно различные характеристики сетевых подключений. Такие как, например, битовая скорость получения данных, количество потерь, задержки. Все это может вызывать на стороне пользователя проблемы воспроизведения, например, замирания изображения (ребуферизация) и долгий старт начала воспроизведения.

Заметим, что пользователь может получать медиапоток без задержек в воспроизведении с битовой скоростью, не превышающей некоторого предельного значения, причем для каждого пользователя оно свое. Для предоставления пользователям возможности получать видео поток в максимальном качестве и без задержек в воспроизведении, используют технологию адаптивной битовой скорости. Данную технологию поддерживает большинство современных протоколов доставки медиапотоков конечным пользователям, например протокол MPEG-DASH [1]. Обычно при использовании протокола MPEG-DASH и технологии адаптивной битовой скорости,

медиа контент кодируется с различными битовыми скоростями и разрешениями. Каждая закодированная версия медиапотока хранится на сервере и разделена на сегменты одинакового размера (например 10 секунд). Для каждой версии медиапотока есть файл описания называемый Media Presentation Description (MPD). Сегменты медиапотока могут быть декодированы независимо, что позволяет медиаплееру клиента свободно переключаться между различными битовыми скоростями на границах сегментов. Решение о выборе соответствующего видео сегмента осуществляется медиаплеером клиента. Он выбирает и запрашивает видео сегмент, битовая скорость которого, больше всего подходит для текущего состояния Интернет соединения пользователя. При изменении характеристик текущего состояния Интернет соединения пользователя, например связанных с его перемещением в пространстве относительно точки доступа wi-fi, медиаплеер может запросить видео сегмент с другой битовой скоростью.

Проблемы выбора битовых скоростей

Существуют рекомендации по формированию наборов битовых скоростей и разрешений медиапотоков для организации видео-трансляций с адаптивными битовыми скоростями. Например, в работе [2] описываются рекомендации представленные сервисами YouTube, Netflix и Apple, ресурс [3] предлагает свои рекомендации. Все они предполагают формирование набора более чем из семи битовых скоростей для одного исходного медиапотока.

Формирование наборов медиапотоков с разными битовыми скоростями для live-трансляций требует больших вычислительных мощностей. В образовательных учреждениях, как правило, нет возможности формировать большое количество

Рогов Александр Александрович – ПетрГУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: togov@petsyu.ru, тел. (814-2) 71-96-21

Воронов Роман Владимирович – ПетрГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: rvoronov@sampo.ru, тел. (814-2) 71-10-68

Петров Евгений Александрович – ПетрГУ, аспирант, e-mail: johnp@petsyu.ru, тел. 8-963-743-20-91

битовых скоростей для одного медиапотока. Поэтому перед администратором стоит задача выбора битовых скоростей для медиапотоков, позволяющих пользователям получить медиапоток в максимальном качестве и без задержек воспроизведения. Более подробно эта задача обсуждается в работе [4]. В работе [5] представлен один из существующих инструментов, который можно использовать при решении данной проблемы. В виду имеющихся недостатков у существующего метода, в статье [6] предлагается новый подход. Он заключается в том, что у каждого пользователя открывшего веб-страницу трансляции, перед основной трансляцией, проигрывается заранее подготовленный тестовый медиапоток с несколькими доступными битовыми скоростями. Медиаплеер пользователя, отправляет статистическую информацию о своей работе на удаленный сервер. На основе полученной информации администратору предлагаются несколько, например, три, наиболее подходящие битовые скорости для проведения основной трансляции. После запуска основной трансляции видеоплеер продолжает отсылать статистическую информацию о своей работе.

Решение задачи выбора битовых скоростей

Реализация подхода, предложенного в работе [6] требует решения оптимизационной задачи по выбору заданного числа битовых скоростей на основе данных полученных от медиаплееров пользователей за определенный период времени. В качестве параметров работы медиаплеера выбраны: текущая битовая скорость медиапотока, которую воспроизводит плеер, и наличие задержки в воспроизведении в данный момент времени. Определим переменные, описывающие входные параметры.

Доступные битовые скорости медиапотоков:

$$u = \{u_1, u_2, \dots, u_l\} \quad u_1 < u_2 < \dots < u_l$$

Массив данных содержащий статистическую информацию, полученную от клиентов: $(y_m(t), z_m(t)), m \in \{1, \dots, n\}$,

$$z_m(t) = \begin{cases} 0, & \text{нет задержек воспроизведения} \\ 1, & \text{есть задержки воспроизведения} \end{cases}$$

$t \in \{0, \dots, T\}$, где n – количество клиентов, T – количество данных для каждого клиента, фактически период времени, за который получены данные, а y_m битовая скорость медиапотока используемая пользовательским плеером в данный момент времени.

Введем переменную $\widetilde{y}_m$ такую, что:

$$\widetilde{y}_m = \begin{cases} y_m(t), & \text{если } z_m(t) = 0; \\ u_{k-1}, & \text{если } z_m(1) = 1 \text{ и } y_m(t) = u_k, k > 1; \\ u_1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Далее, определим набор из трех битовых скоростей

$$\widetilde{x}_1, \widetilde{x}_2, \widetilde{x}_3, \quad \widetilde{x}_m \in u, \quad m = 1, 2, 3, \quad \widetilde{x}_1 < \widetilde{x}_2 < \widetilde{x}_3.$$

Найдем значение битовой скорости $x_m, m = 1, 2, \dots, n$ такое, что:

$$x_m \in \max [\widetilde{x}_1; \widetilde{x}_2; \widetilde{x}_3], \quad \widetilde{y}_m(t) \geq x_m.$$

Для выбранного набора битовых скоростей найдем, степень отличия от реально используемых значений битовых скоростей:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n (\widetilde{y}_m(t) - x_m)$$

Выберем такой набор $\widetilde{x}_1, \widetilde{x}_2, \widetilde{x}_3$, что

$$\sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n (\widetilde{y}_m(t) - x_m) \rightarrow \min.$$

Найденный набор будет решением задачи. Оптимальное решение в случае $l=9$ и выбора 3-х битовых скоростей можно найти полным перебором. В общем случае данную задачу можно решить методом динамического программирования.

Обозначим

$$f_0(x_1, \dots, x_m) = \sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n (\widetilde{y}_m(t) - x_m)$$

Очевидно, что

$$\sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n (\widetilde{y}_m(t) - x_m) = \sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n \widetilde{y}_m(t) - \sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n x_m = \sum_{t=0}^T \sum_{m=1}^n \widetilde{y}_m(t) - (T+1) \sum_{m=1}^n x_m \quad (4)$$

Так как первая сумма в полученном выражении и множитель второй суммы $(T+1)$ равны константе, то поиск минимума функции f_0 эквивалентен поиску максимума функции

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{m=1}^n x_m.$$

Требование выполнения неравенства $\widetilde{y}_m(t) \geq x_m$

при всех $t \in \{0, \dots, T\}$ равносильно неравенству

$$\min_{t \in \{0, \dots, T\}} \widetilde{y}_m(t) \geq x_m.$$

Обозначим

$$Y_m = \min_{t \in \{0, \dots, T\}} \widetilde{y}_m(t).$$

Пусть $Y_1 \leq Y_2 \leq \dots \leq Y_n$. Если это не так, то можно добиться выполнения этого условия путем сортировки входных данных. Обозначим множество $U = \{Y_1, \dots, Y_n\}$.

Сформулируем задачу оптимизации, которую будем называть основной, эквивалентную исходной задаче. Требуется найти подмножество V множества U , такое что $|V| \leq 3$, а также такие $x_m \in V, m = 1, \dots, n$, что выполнены условия $x_m \leq Y_m, m = 1, \dots, n$ и достигается максимум функции

$$\sum_{m=1}^n x_m \rightarrow \max.$$

Для поиска решения основной задачи предлагается разработать алгоритм, основанный на методе динамического программирования.

Введем обозначение:

$$f_{ij} = \max\{\sum_{m=1}^i x_m\},$$

где

$$x_m \in V, x_m \leq Y_m, m = 1, \dots, i, |V| \leq j, V \subset \{Y_1, \dots, Y_i\}$$

$$i = 1, \dots, n, j = 1, 2, 3.$$

Задача поиска f_{ij} отличается от основной задачи меньшим числом переменных и меньшей мощностью искомого множества V . Решение исходной основной задачи, очевидно, равно f_{n3} .

Утверждение 1. Для всех $j = 1, 2, 3$ $f_{1j} = Y_1$.

Утверждение 2. Пусть для фиксированных $i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, 2, 3\}$ множество V^* и числа $x_1^*, \dots, x_i^*$ доставляют максимум для f_{ij} . Тогда

- 1) $Y_1 \in V^*, x_1^* = Y_1$;
- 2) Для всех $m = 2, \dots, i$

$$x_m^* = \begin{cases} Y_m, & \text{если } Y_m \in V^* \\ x_{m-1}^*, & \text{иначе;} \end{cases}$$

- 3) Если $i > 1$, то V^* и числа $x_1^*, \dots, x_{i-1}^*$ доставляют максимум для $f_{(i-1)j}$;
- 4) Если $i > 1$, и $Y_i \in V^*$, то множеств $V^* \setminus \{Y_i\}$ и числа $x_1^*, \dots, x_{i-1}^*$ доставляют максимум для $f_{(i-1)(j-1)}$.

Обозначим g_{ij} значение переменной x_i , которое доставляет максимум для f_{ij} .

Пусть $i > 1$. Учитывая, что если $x_i^* = Y_i$, то для всех $m < i$ $x_m^* \in V^* \setminus \{Y_i\}$ получаем

$$a_{ij} = \max\{Y_i + \sum_{m=1}^{i-1} x_m\},$$

где

$$x_m \in V, m = 1, \dots, i-1, |V| \leq j-1, V \subset \{Y_1, \dots, Y_{i-1}\},$$

$$b_{ij} = \max\{x_{i-1} + \sum_{m=1}^{i-1} x_m\},$$

где

$$x_m \in V, m = 1, \dots, i-1, |V| \leq j, V \subset \{Y_1, \dots, Y_{i-1}\},$$

$$f_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}.$$

Отсюда

$$f_{ij} = \max\{f_{(i-1)(j-1)} + Y_i; f_{(i-1)j} + x_{i-1}^*\}, i = 2, \dots, n, j = 2, 3.$$

Таким образом, получен следующий алгоритм решения основной задачи.

$$f_{1j} = Y_1 \text{ для всех } j = 1, 2, 3,$$

$$g_{1j} = Y_1 \text{ для всех } j = 1, 2, 3,$$

$$f_{i1} = f_{(i-1)1} + g_{(i-1)1}, i = 2, \dots, n,$$

$$f_{ij} = \max\{f_{(i-1)j} + g_{(i-1)j}; f_{(i-1)(j-1)} + Y_i\}, i = 2, \dots, n, j = 2, 3$$

$$g_{i1} = g_{(i-1)1}, i = 2, \dots, n$$

и g_{ij} равно $g_{(i-1)j}$, если максимум достигается на первом слагаемом и равно Y_i в противном случае. В результате работы алгоритма будет найден интересующий нас набор битовых скоростей g_{n1}, g_{n2}, g_{n3} .

Выводы

Тестирование, предложенного подхода решения задачи выбора битовых скоростей медиапотока, планируется осуществить на экспериментальных данных, а также на данных полученных с помощью системы имитационного моделирования, переключения плеера между доступными битовыми скоростями медиапотока, передаваемого в режиме реального времени по сети [4].

В виду того, что в ходе видеотрансляции, состояние Интернет соединения у пользователей может меняться и могут появиться дополнительные пользователи, возникает задача определения времени, через которое требуется снова произвести выбор значения передаваемых битовых скоростей. Описание данной задачи и предполагаемые методы решения авторы опубликуют в следующей статье в ближайшее время.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности.

Литература

1. Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH).- Электрон. дан. - Режим доступа: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57623.
2. Christian Kreuzberger, Benjamin Rainer, Hermann Hellwagner, Laura Toni, Pascal Frossard, A Comparative Study of DASH Representation Sets Using Real User Characteristics, In Proceedings of the 26th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (ACM, ed.), ACM, New York, NY, USA, pp. 4:1-4:6, 2016.
3. Video Encoding Service for Adaptive Streaming. – Электрон. дан. - Режим доступа: <https://www.bitcodin.com/>.
4. Рогов, А. А. Моделирование переключений медиаплеера между битовыми скоростями [Текст]/ А.А. Рогов, Е. А. Петров // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2016. - № 9. – С.48-56.

5. Забровский, А. Л. Критерий оценки качества образовательных мультимедийных потоков, транслируемых в реальном режиме времени [Текст] / А.Л. Забровский // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Математическое моделирование и информационные технологии. – 2013. – Вып. 4, No 1. – С. 26-32.

6. Рогов, А.А. Оптимизационная модель выбора битовых скоростей медиапотоков [Текст]// А.А. Рогов, Е. А. Петров, Р.В. Воронов // Информационная среда вуза XXI века : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Петрозаводск, 20-23 сент. 2016 г. – Петрозаводск, 2016. – С. 131-134.

Петрозаводский государственный университет

THE TASK OF CHOOSING BIT RATES OF MEDIA STREAMS

A.A. Rogov, Doctor of Technical Science, Professor, Petrozavodsk state university, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: rogov@petrsu.ru

R.V. Voronov, Ph.D, Associate professor, Petrozavodsk state university, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: rvoronov@sampo.ru

E.A. Petrov, postgraduate, Petrozavodsk state university, Petrozavodsk, Russian Federation, e-mail: johnp@petrsu.ru

Network impairments can affect media streams that are transmitted via Internet. These impairments can cause problems on the client side such as stopping media stream for buffering or long starting of media stream. Adaptive streaming strategies over HTTP help to avoid these problems. The source stream is encoded in different versions (representations) and then these representations are available for users. This approach allows clients to have an ability to select a video in the representation that best fits their needs. Creating a set of bit rates in real time is very resource-intensive process. Usually it is possible to generate a set of only 4-6 bit representations. There is a very difficult problem to properly select the representation set. In this paper, we provide an approach for optimizing the set of bit rates of a media stream. This approach takes into account the needs of customers watching this media stream at that moment. It helps to identify an optimal set of bit rates for a media stream which gives the best possible quality to a media stream within users' available Internet connection and reduces streaming delay to the minimum. The algorithm for solving the problem based on the dynamic programming method is presented in the paper. This approach was tested in our testbed for a media stream transmitted by MPEG-DASH protocol. The test results showed that the presented approach may be used to solve problems described above

Key words: e-learning, bit rate, multimedia stream, MPEG-DASH

References

1. Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH).- Electron. Dan.- Access: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57623.
2. Christian Kreuzberger, Benjamin Rainer, Hermann Hellwagner, Laura Toni, Pascal Frossard, A Comparative Study of DASH Representation Sets Using Real User Characteristics, In Proceedings of the 26th International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (ACM, ed.), ACM, New York, NY, USA, pp. 4:1-4:6, 2016.
3. Video Encoding Service for Adaptive Streaming.- Electron. Dan.- Access: <https://www.bitcodin.com/>.
4. Rogov A. A., Petrov E.A. Modelirovanie pereklyuchenij mediapleera mezhdubitovymi skorostjami[Simulating Media Player Switching between Bit Rates]// Distance and virtual learning.- 2016. № 9. – P.48-56.
5. Zabrovskiy A. L. Kriterij ocenki kachestva obrazovatel'nyh mul'timedijnyh potokov, transliruemyh v real'nom rezhime vremeni [The criteria of quality assessment of educational multimedia streams transmitted in real time mode]// Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN.- 2013. №1. P. 26-32.
6. Rogov A.A., Petrov E. A., Voronov R. V. Optimizatsionnaya model' vybora bitovyh skorostej media-potokov [Optimization model of choosing bitrates of media streams]// The information environment of high school of the XXI century: Proceedings of the X International scientific-practical conference Petrozavodsk, September 20-23. 2016. – Petrozavodsk, 2016. – P. 131-134.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ КРОСС-СТРУКТУРНЫМИ ФУНКЦИЯМИ И МОДЕЛЯМИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, В.Н. Шапошников

В работе решены задачи статистического расчёта значений ГОСТовских характеристик поверхностей изделий, обрабатываемых на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), на основе моделирования профиля шероховатости поверхности изделия, представленного числовой временной последовательностью, которая в исследовании интерпретируется как реализация нестационарного случайного процесса. Для обоснования возможности статистического описания использованы кросс-структурные функции, а обработка данных проведена с использованием динамической предикторной модели случайных процессов.

Полученная алгоритмическая модель разработана для использования в оперативном управлении станочной обработкой с корректировкой качества изделия. При оценке фактической площади контакта с кромкой режущего инструмента на её основе можно принять решение об уровне износа и замене резца, что позволит значительно снизить число бракованных изделий. Результаты исследования включены в ПО токарно-фрезерного обрабатывающего участка заказчика со станками ЧПУ для контурного фрезерования сложных по форме деталей с высокими требованиями к чистоте обработки поверхности.

Предложенный подход к созданию системы управления станочным парком универсален и может быть применён для управления современными промышленными роботами.

Использование в данном направлении кросс-структурных функций и динамических моделей нестационарных случайных процессов определяет научную новизну исследований, а разработанные на их основе технологии – практическую значимость

Ключевые слова: профиль шероховатости, кросс-структурные функции, динамическая предикторная модель

Введение

В ходе моделирования шероховатости массивы значений геометрических характеристик $y(t)$ механически обрабатываемых поверхностей рассматривались как выборочные функции нестационарного случайного процесса $Y(t)$. Связано это не только с визуальным сходством профиля шероховатости (рис.1) с типичной реализацией нестационарного случайного процесса (НСП). Для обоснования статистического подхода был проведён структурный анализ, предложенный [1] А.Н. Колмогоровым, позволивший установить возможность его аппроксимации моделью НСП, нестационарного по первой моментной функции.

Шероховатость поверхности [2] является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает влияние на эксплуатационные показатели изделий. Термины и определения основных понятий по шероховатости поверхности, используемые в данной работе, соответствуют ГОСТ 25142—82.

Описание проблемы

Требования, предъявляемые со стороны стандартов к характеристикам классов шероховатости поверхности, в практических руководствах и ТУ устанавливаются, исходя из

дальнейшего функционального назначения поверхности и связанного с ним обеспечения заданного качества изделий.

К этим условиям ГОСТ 2789—73¹ добавляет [3] требования к состоянию поверхности изделий, независимо от способа ее получения или обработки. Это дает возможность применять требования стандарта к поверхностям, обработанным резанием и другими методами, например, литьем, прессованием, электрофизическими и электрохимическими методами и, тем самым, исключить второстепенные данные из допустимого множества возможных вариаций исследуемых параметров. Нормированные параметры шероховатости поверхности оцениваются по неровностям поперечного профиля, получаемого путём сечения реальной поверхности плоскостью в нормальном сечении (перпендикулярно направлению неровностей). С целью отделения характеристик шероховатости от других неровностей поверхности с относительно большими шагами, таких как отклонения формы и волнистости, их рассматривают в пределах ограниченного участка (рис. 1), длина которого определяется как базовая длина l , на которой основными показателями являются искомые численные характеристики шероховатости. При этом шероховатость изделия определяется как совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная на участке профиля базовой длины. Эта информация позволяет описывать поведение траектории профиля шероховатости методами локального прогнозирования.

Ганцева Екатерина Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: caladze@yandex.ru
Каладзе Владимир Александрович – МИКТ, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: wakaladze@yandex.ru
Шапошников Виктор Николаевич – ОАО «АГРОЭЛЕКТРОМАШ», канд. техн. наук, профессор, e-mail: aem142@yandex.ru

¹ Оба ГОСТа имеют статус действующих

Длина интервала используемых измерений может содержать один или несколько интервалов базовой длины.

Профиль определяется как линия пересечения исследуемой поверхности с секущей плоскостью. Под понятие случайный профиль подпадает аperiодический профиль, который рассматривается как траектория реализации случайной функции, например, профиль, полученный после операции шлифования и т.п.

В качестве базовой линии для определения вариаций характеристик используется средняя линия профиля m , определяемая по абсолютным геометрическим значениям размеров изделия, с учётом его центровых показателей. При этом, в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии предполагается минимальным.

Выступ профиля – это часть профиля, опирающаяся на отрезок r_{wi} , соединяющий две соседние точки пересечения его со средней линией

профиля, и направленная из изделия. Аналогично определяется впадина профиля относительно отрезка r_{vi} , лишь с учётом направления профиля вовнутрь изделия. Нормативные (ГОСТовские) величины, соответствующие максимальным значениям выступа y_{wmax} и впадины y_{vmax} , определяют предельные линии выступов и впадин вдоль измеряемой поверхности эквидистантно средней линии профиля. Величина, оценивающая локальную неровность профиля, определяется через значения выступа y_{wi} и сопряжённой ему впадине y_{vi} , расположенных на отрезке r_i .

R_{max} – это расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Уровень сечения профиля p – это расстояние между линией выступов (впадин) и линией, пересекающей профиль эквидистантно средней линии профиля, выраженное в процентах или долях относительно R_{max} .

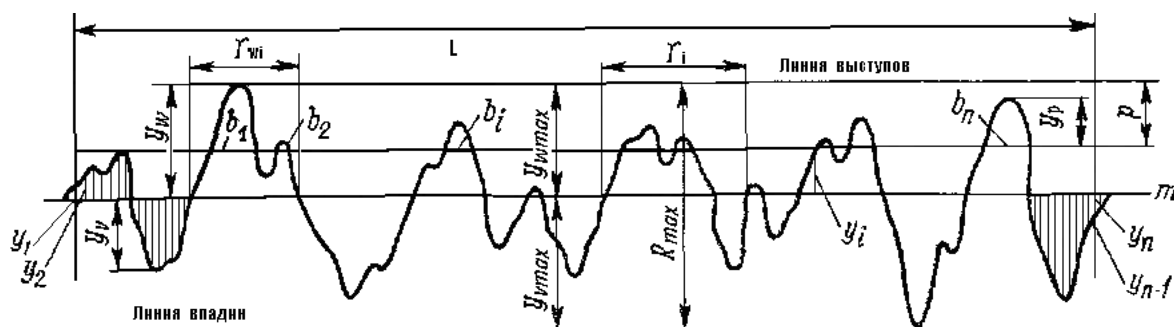


Рис. 1. Профиль шероховатости, его особенности и параметры

Опорная длина профиля η_p – это сумма длин отрезков b_i , отсекаемых линией уровня сечения профиля, проходящей на заданном эквидистантном расстоянии от средней линии, от локальных выступов (впадин) профиля базовой длины.

Параметр $t_p = \eta_p / l$ считается наиболее информативным параметром о высотных свойствах и протяжённости профиля (он комплексно характеризует высоту и относительную протяжённость неровностей профиля).

Исследование проблемы

Применение модификации [4] структурной колмогоровской классификации [1] для анализа исходных числовых последовательностей $y(t)$ позволило выявить их структуру, построенную на последовательных приращениях НСП $Y(t)$

$$\Pi^n[Y(t)] = \Pi(\Pi^{n-1}[Y(t)]), \quad (1)$$

где первое приращение

$$\Pi(t, \tau) = \Pi[Y(t)] = Y(t) - Y(t - \tau). \quad (2)$$

Числовая кросс-структурная функция [4], сформированная на закономерности вида

$$\hat{O}_{s,u}(t, \tau) = M \{ [\Pi^s(t) - \Pi^s(t, s\tau)] [\Pi^u(t) - \Pi^u(t, u\tau)] \}, \quad (3)$$

позволила определить динамическую взаимосвязь гармоник процесса.

Исследование этой числовой модели позволило установить структурные характеристики аппроксимирующего НСП и порядок его динамики, что, в свою очередь, обеспечило адекватную идентификацию динамической предикторной модели, предназначенную для расчёта искомых численных ГОСТовских характеристик.

Исходные данные рассматриваются как нестационарные временные последовательности (реализации) случайных процессов. Поскольку всевозможные изделия, обрабатываемые на станках с ЧПУ, в конечном результате имеют поверхность с различной степенью шероховатости, то оценка качества изделия зависит от предъявляемых к нему требований, критериев. В основу всех применяемых критериев входит измеряемая информация, отражающая величину отклонения профиля обработанной поверхности от норматива. При этом измеряемая информация содержит как полезный сигнал, несущий сведения об истинной величине

шероховатости поверхности, так и искажающий шум измерения, связанный как с классом измерительного прибора, так и с влиянием окружающей среды на результаты измерений. Помеха измерения (шум) в данной задаче связана, в том числе, с большим количеством неконтролируемых показателей, рассматриваемых как случайные, и потому в каждый момент времени определяется как случайная величина, представленная их суммарным эффектом. Измеряемый сигнал рассматривается как непрерывный случайный процесс, поскольку его значения не связаны детерминированной закономерностью. Но результаты наблюдений представлены в дискретной форме, как числовые данные, полученные с квантованием по времени в точках измерения. Числовая последовательность, определяющая результаты измерений, рассматривается как сумма полезного сигнала и помехи измерения, при этом полагается, что соотношение их интенсивностей позволяет аппроксимировать полезный сигнал методами фильтрации, а динамический подход формирует оперативные оценки, используемые в реальном масштабе времени.

Целью данной работы является выделение полезного сигнала, которым является истинный профиль шероховатости, с расчётом значений в ходе его изменения на фоне искажающего шума.

Для этого было проведено описание эволюции профиля шероховатости изделий числовой динамической моделью. Исходной информацией для математического описания поведения возможной траектории шероховатости служили значения ординат реализованного профиля y_i .

Легко видеть, что предельные характеристики самого рассматриваемого процесса определяют его как стационарный, в смысле закономерности и его параметров. Однако его реализации, являющиеся результатами измерений, представлены конечными числовыми нестационарными временными последовательностями, а все выборочные функции процесса, не отвечающие условиям стационарности, могут быть определены как нестационарные в широком смысле.

Подробное изучение текущего состояния случайного процесса $Y(t)$ по выборочной функции $y(t)$ требует применение статистического анализа динамики наблюдаемой информации о процессе. Традиционный статистический анализ связан с аппроксимацией аналитической формы функции $f(t)$ по её табулированным значениям. А динамический статистический анализ [5] предполагает получение дополнительной, качественно новой информации, содержащей оценки дифференциальных характеристик $d^m f / dt^m$ основной тенденции случайного процесса. При этом фазовые траектории процесса рассматриваются не как фиксированные кривые на реализованном интервале наблюдений, а

как динамично меняющиеся состояния в режиме реального времени.

Получение устойчивых оценок производных, в особенности высокого порядка, непосредственно из данных наблюдения, невозможно из-за искажённости последних помехой измерения. Эту проблему решает каскадный фильтр, входящий в состав динамической предикторной модели (ДПМ) [5]. В соответствии с моментами наблюдения, равноотстоящими в данном случае, временная ось равномерно квантуется с тактом Δt и вводится обозначение индекса времени $t = i$.

В процессе работы была определена область варьирования адаптивного параметра фильтрации α и, в соответствии с (3), подобрано значение структурного параметра n , определяющего порядок каскадного фильтра. Наиболее адекватная данной задаче, модель ДПМ третьего порядка, описывающая эволюцию случайных процессов с динамикой второго порядка, представлена следующими двумя основными модулями:

- каскадным фильтром

$$S_i^k(y) = (1 - \alpha)S_{i-1}^k(y) + \alpha S_i^{k-1}(y) \quad (4)$$

при $k = 0, 1, \dots, n$, $S_i^0 = y$, $\alpha \in (0, 1)$,

эффективным преобразованием, которого является оператор экспоненциального среднего [6] в рекуррентной форме

$$S_i(y) = (1 - \alpha)S_{i-1}(y) + \alpha y_i; \quad (5)$$

- динамическим ядром, с компонентами:
 - предиктором

$$f_{i+1} = \sum_{k=0}^n f_i^{(k)}(y, \mu^k, \psi), \quad (6)$$

$$f_i^{(k)} = \mu^k \psi \quad \text{при } k = \overline{0, n}, \quad (7)$$

где $f_i^{(k)}$ – оценка k -ой производной через нисходящие разности и $\mu^k = \alpha^k / k!(1 - \alpha)^k$;

- и параметровариатором, который формирует структурные параметры модели из значений всех уровней $S_i^k(y)$ каскадного фильтра

$$\psi_i^0(y) = 4S_i(y) - 6S_i^2(y) + 4S_i^3(y) - S_i^4(y), \quad (8)$$

$$\psi_i^1(y) = 6S_i(y) - 14S_i^2(y) + 11S_i^3(y) - 3S_i^4(y) \quad (9)$$

$$\psi_i^2(y) = 4S_i(y) - 11S_i^2(y) + 10S_i^3(y) - 3S_i^4(y) \quad (10)$$

$$\psi_i^3(y) = S_i(y) - 3S_i^2(y) + 3S_i^3(y) - S_i^4(y). \quad (11)$$

Решение такой задачи идентификации связано с реконструкцией значений наблюдаемой скалярной выборочной функции y_i в текущее значение вектора $\bar{f} = (f_0, f_1, \dots, f_n)$ – оценок состояния исследуемого случайного процесса, который является элементом фазового пространства W^{n+1} . Полученные оценки

описывают полезный сигнал, как основную тенденцию развития случайного процесса $Y(t)$.

Операция распараллеливания текущей информации и выявления данных, необходимых для формирования $\bar{f}$ – оценок фазового состояния случайного процесса, выполняется каскадным фильтром и обеспечивает нахождение вектора $\bar{S} = (S^1, \dots, S^{n+1})$, компоненты которого рассчитываются на соответствующих уровнях каскада. Функции по обработке измеряемой информации, выполняемые каскадом, связанные с подавлением шума и выделением полезного сигнала, распределены между его уровнями. Так первый (нижний) уровень (5) каскадного фильтра подавляет высокочастотную составляющую, по сравнению с полезным сигналом, помехи наблюдения. А высшие уровни, начиная со второго, в основном участвуют в описании основной тенденции, выделяя соответствующий диапазон гармоник полезного сигнала. При этом набор уровней каскадного фильтра связан с числом осцилляций – перемен знака у реализаций полезного сигнала на временном интервале исследования. Задачи по выявлению у функции числа осцилляций встречаются также в гидрологических, экономических и социальных исследованиях, в метеорологии, астрономии и других областях, связанных с изучением выборочных функций.

Кроме расчётов на натурных данных был проведён вычислительный эксперимент для изучения свойств предложенной модели при описании поведения профиля шероховатости.

В ходе эксперимента использовалась возможность оперирования структурным и адаптивным параметрами, определяющими вид динамической модели.

Методика проведения вычислительного эксперимента с моделью основана на двух информационно связанных этапах: имитации процесса в соответствии с выявленными реальными его характеристиками и параметрическая идентификация модели по данным первого этапа.

Важной частью вычислительного эксперимента является имитация, от которой в наибольшей степени зависит сходство его результатов с данными, полученными из натурального эксперимента.

Статистическая числовая временная последовательность, имитирующая массив наблюдаемых исходных данных, была определена набором ранжированных в зависимости от момента наблюдения i значений y_i . При этом номер момента, определённый как начальный, обнулялся. Значения временной последовательности определялись суммой мгновенного значения основной тенденции X_i и соответствующего члена случайной последовательности ξ_i , имитирующей

центрированную стационарную компоненту $\Xi(t)$, изучаемого случайного процесса. Так для имитации осциллирующей основной тенденции случайного процесса использовалась зависимость:

$$y_i = A \sin\left(\frac{b}{c}i + \varphi\right) + \xi_i. \quad (12)$$

Для проведения вычислительного эксперимента в среде Visual Studio .NET были разработаны программные прикладные модули, обеспечивающие средства управления ходом эксперимента [7], обработки и представления его результатов. Исследования проводились на программном комплексе [8], который разработан как проблемно-ориентированная система для проведения компьютерного эксперимента.

В связи со случайностью исследуемого процесса в ходе эксперимента многократно повторялись вычисления по обработке статистических данных при однородных и изменяющихся исходных условиях и данных. Возможности программного приложения позволяют, анализируя отчеты по проведённым исследованиям, повторно использовать отдельные их части для проведения новых расчётов.

На этапе имитации случайного процесса выполнялись условия: во-первых, соответствие предлагаемого образа процесса своему прототипу – профилю, во-вторых, согласованность структурных параметров модели со степенью аппроксимирующей функции основной тенденции.

Результаты эксперимента существенно зависят от используемого вида помехи наблюдения, рассматриваемой как центрированный стационарный случайный процесс общего вида. С этой целью для имитации таких случайных процессов использовались массивы генерации базовых равномерных случайных величин с последующим аналитическим или статистическим моделированием различных распределений.

На этой основе были сформированы искусственные реализации случайных процессов с дискретным временем как случайные временные последовательности, имитирующие реально изменяющиеся ординаты профиля с монотонными и колебательными основными тенденциями, на которых проводилась исследовательская работа по изучению свойств моделей различной сложности.

Для получения реализаций нормально распределённой (гауссовской) случайной составляющей ξ_i использовался привычный статистический способ моделирования на основе зависимости

$$\xi_i = N_i u = \sqrt{\frac{3}{\mu}} \sigma \sum_{j=1}^{\mu} (2u_{ij} - 1) + \beta, \quad (13)$$

где i – число шагов в эксперименте, β и σ^2 – первые два момента статистической последовательности ξ_i , а $u_j \in (0; 1)$ – базовые

псевдослучайные числа, μ – число наблюдений в параллельных опытах. В исследовании было принято, что при общем объёме генерированного массива от 100 до 500, $\mu = 10$. Интенсивность составляющей $\Xi(t)$, установленная на уровне $\sigma = 1$, в эксперименте варьировалась с помощью мультипликативного коэффициента, а $\beta = 0$ в соответствии с условиями измерений.

Для расчёта значений экспоненциально распределённой случайной стационарной составляющей ξ_i , как альтернативы нормальной помехе наблюдения, применялся аналитический способ моделирования случайной величины с использованием обратного преобразования $\xi = -\frac{1}{\lambda} \ln u$.

Качество обработки поверхности отвечает нормативу, если в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля от базовой линии минимально. По условиям, выдвинутому заказчиком, аналогично (относительно базовой линии) оценивается и качество математического моделирования. При настройке применяемой динамической предикторной модели, в ходе вычислительного эксперимента адекватность и точность результатов оценивались по соответствию динамических и статистических характеристик с реальным профилем.

Результаты математического моделирования оценивались по следующим нормативным показателям:

1) опорная длина профиля η_p , как сумма длин отрезков пересечения базовой линии с профилем;

2) относительная опорная длина профиля $t_p = \eta_p / l$;

3) высота неровности профиля по десяти точкам $R_z = \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pm,i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vm,i}| \right) / 5$;

4) средний шаг S местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины.

Параметр t_p содержит наибольшую информацию о высотных свойствах профиля, т.к. она аналогична функции распределения [9] отклонений «гребней» профиля от норматива. Использование этих нормативных показателей при оценке фактической площади контакта с кромкой режущего инструмента, позволяет принимать решение об уровне износа и замене резца.

В «ручном режиме» решение о смене резца принимается на основе оценки качества обработанной поверхности изделия. Прогноз момента замены в этом случае основан сугубо на индивидуальных возможностях контролёра: опыте, интуиции и умении связывать многомерную числовую информацию с возможными вариантами принимаемого решения. По различным причинам вмешательство «человеческого фактора» в процесс принятия решения приводит к увеличению числа бракованных изделий.

Внедрение автоматизированного способа оценки ситуации с использованием математического моделирования динамики профиля обработки и прогноза на технологически оптимальный интервал времени обеспечит снижение процента брака выпускаемых полуфабрикатов и изделий, оптимизирует момент заточки резца, увеличит его рабочий ресурс, существенно снизит расход электроэнергии на единицу рабочего времени станка и поднимет производительность труда на участке.

Поскольку качество результирующей информации эксперимента определяется достоверностью исследуемой модели, то для описания различных законов изменения профиля, характеризующих основную тенденцию случайного процесса, выбирались соответствующие им модели, порядок которых выявлялся на основе кросс-структурного исследования.

В результате эксперимента было выявлено, что при изменении направления периодического полезного сигнала минимум ошибки при прогнозировании на четыре шага достигается для модели, начиная с третьего порядка. Результаты исследования также показали, что существенные нарушения периодичности профиля значительно снижают возможности прогнозирования.

Абсолютная величина ошибки прогноза осциллирующего дрейфа оценивалась практически по той же зависимости, что и для монотонного дрейфа. Смена направления изменения основной тенденции (с убывания на рост и наоборот) удачно прогнозировалась более чем в 90% случаев на один шаг, и в 30% опытов прогноз оправдывался на два шага вперёд. При этом качество прогноза в большей степени зависело от величины амплитуды колебаний A в (9), чем от вариации значений b и c . В зависимости от интенсивности составляющей ξ_i прогноз оправдывался при соотношении $A/\sigma > 2.6$.

При отслеживании основной тенденции с целью выявления различных особенностей поведения изучаемого процесса были выделены следующие области допустимых вариаций адаптивного параметра модели.

–Короткие периоды усреднения (при этом удаляются высокие частоты) для первого порядка предикторной модели, параметр адаптации принимает значения $\alpha \in [0.283, 0.324]$.

–Средние периоды усреднения (удаляются высокие и верх средних частот) второго порядка предикторной модели, параметр адаптации принимает значения $\alpha \in [0.381, 0.445]$.

–Длинные периоды усреднения (выделяются низкие частоты) порядка предикторной модели равен 3, параметр адаптации принимает значения $\alpha \in [0.513, 0.597]$.

Полученные области варьирования параметра фильтра определяют его связь со спектром исследуемого процесса.

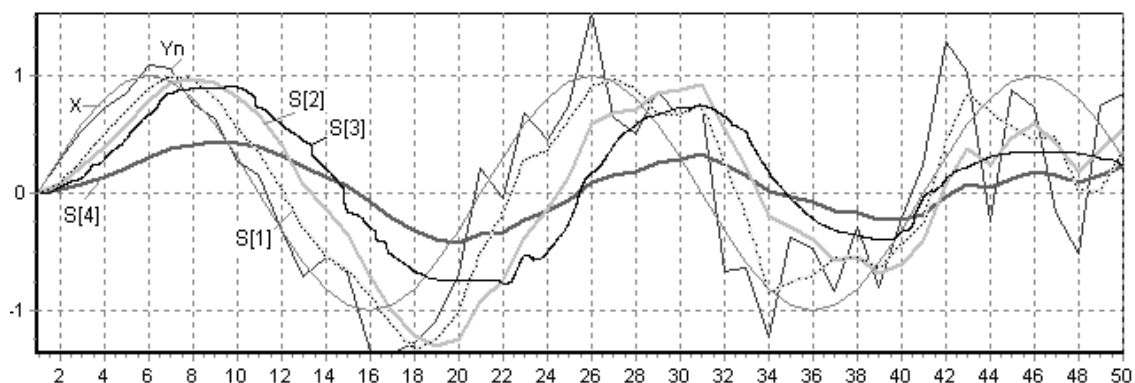


Рис. 2. Наблюдаемая случайная временная последовательность, полезный сигнал и траектории каскадной фильтрации

Пользовательский интерфейс поддерживает стандарты разработки прикладного программного обеспечения и ориентирует пользователя на проведение активного эксперимента. Модули графического представления данных дополняют картину эксперимента, результаты расчётов также можно экспортировать в приложения Microsoft Office.

Таблицы исходных данных, имитирующие информационные файлы, генерировались с помощью модуля имитации, разработанного на языке C#.

Заключение

Анализ результатов проведённых вычислительных экспериментов подтвердил достоверность выдвинутых теоретических заключений, что позволяет сделать следующие выводы.

1. На сложных траекториях профиля эффективно работает динамическая модель третьего порядка.

2. Задачу подбора значений параметров фильтрации, сглаживания и прогноза следует ставить и решать, как задачу оптимальной настройки.

3. Величина параметра α зависит как от интенсивности случайной составляющей процесса, так и от особенностей основной тенденции.

Литература

1. Колмогоров, А.Н. Спираль Винера и некоторые другие интересные кривые в гильбертовом пространстве

[Текст] / А.Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1940. – Т. 26. – № 1. – С.115-118.

2. Гжиров, Р.И. Краткий справочник конструктора [Текст] / Р.И. Гжиров. Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.

3. Палей, М.А. Отклонения формы и расположения поверхностей. 2-е издание [Текст] / М.А. Палей. М.: Изд-во стандартов, 1973. – 244с.

4. Kaladze, V.A. Mathematical models of casual processes with stationary increments and the non-uniform information dynamic processing: Monograph [Text] / V.A. Kaladze. – Lorman, MS, USA: Science Book Publishing House, 2012. -136p.

5. Каладзе, В.А. Стохастические структуры динамических моделей: формализация динамического ядра [Текст] / В.А. Каладзе // Системы управления и информационные технологии - Москва-Воронеж. – 2009. - № 4. - С.12-15.

6. Каладзе, В.А. Множественность форм экспоненциального фильтра [Текст] / В.А. Каладзе // Вестник воронежского государственного университета. – 2009. - № 2. – С.59-63.

7. Подвальный, С.Л. Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. – Т. 8. - № 11. - С.17-23.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612349. Программный комплекс «Предметно-ориентированная среда алгоритмического моделирования динамики нестационарных процессов». Правообладатели-авторы: Каладзе В.А., Ганцева Е.А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 марта 2011 г.

9. Каладзе В.А. Описание и оценка шероховатости изделий методами статистической динамики [Текст] / В.А. Каладзе, В.Н. Шапошников // Ползуновский вестник. – Барнаул. - 2010. № 2. – С. 71-76.

Воронежский государственный технический университет
Международный институт компьютерных технологий (г. Воронеж)
ОАО «АГРОЭЛЕКТРОМАШ» (г. Воронеж)

CROSS-STRUCTURAL FUNCTION AND MODEL OF DYNAMIC FORECASTING FOR MATHEMATICAL EXPOSITION OF THE PROFILE IRREGULARITIES OF PRODUCTS

E.A. Gantseva, Candidate of Technical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: caladze@yandex.ru

V.A. Kaladze, Doctor of Technical Sciences, Professor, The International Institute of Computers Technology, Voronezh, Russian Federation, e-mail: wkaladze@yandex.ru

V.N. Shaposhnikov, Candidate of Technical Sciences, the General Director, OAO «AGROELEKTROMASH», Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: aem142@yandex.ru

In paper problems of statistical calculation of values of GOST's performances of surfaces of products are solved. Outcomes are used for control of machine tools with computer numerical control (CNC). For this purpose data about a grain of a surface imperfections of a product are considered in the form of casual numerical temporary sequence, as realisations of nonstationary casual process. For a substantiation of a possibility of statistical exposition are used function cross-structural. Data processing is to fulfil with use dynamic predictors models of casual processes.

The received algorithmic model is developed for use in an operational control on machine tools with updating of quality of a product. According to actual square of contact to an edge of the cutting tool it is possible to make a solution on level of deterioration and cutter replacement. It will allow to lower number of the rejected products considerably. Outcomes of research are included in soft a tokarno-milling treating site of the customer with machine tools CNC for contour milling of complicated details under the form with high requirements to cleanliness of handling of a surface.

The offered approach to creation by a control system by park of machine tools is universal. It can be applied to control of modern industrial robots.

A use function cross-structural and dynamic model of nonstationary casual processes defines scientific novelty of researches. The process engineerings developed on their basis have the practical importance

Key words: a irregularities profile, function cross-structural, dynamic predictor model

References

1. Kolmogorov, A.N. Spiral` Vinera i nekotorye drugie interesnye krivye v gil'bertovom prostranstve [Helix Wiener and some other interesting curves in a Hilbert space] [Text] / A.N. Kolmogorov // DAN SSSR. – 1940. - T. 26. - № 1. – S.115-118.
2. Gzhirrov, R.I. Kratkii` spravochnik konstruktora [Short manual of the designer] [Text] / R.I. Gzhirrov. L.: Mashinostroyeniye, 1983. – 464 s.
3. Palei`, M.A. Otcloneniiia formy` i raspolozheniia poverkhnostei` [Deviations of the form and disposition of surfaces]. 2-e izdanie [Text] / M.A. Palei`. M.: Izd-vo standartov, 1973. – 244s.
4. Kaladze, V.A. Mathematical models of casual processes with stationary increments and the non-uniform information dynamic processing: Monograph [Text] / V.A. Kaladze. – Lorman, MS, USA: Science Book Publishing House, 2012. -136p.
5. Kaladze, V.A. Stokhasticheskie struktury dinamicheskikh modelei`: formalizatsiya dinamicheskogo yadra [Stochastic structures of dynamic models: formalisation of the dynamic kernel] [Text] / V.A. Kaladze // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii - Moskva-Voronezh. – 2009. - № 4. - S.12-15.
6. Kaladze, V.A. Mnozhestvennost` form eksponentsial'nogo fil'tra [Plurality of forms of the exponential filter] [Text] / V.A. Kaladze // Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2009. - № 2. – S.59-63.
7. Podval'nyi`, S.L. Mnogoal'ternativnost` kak osnova obespecheniya intellektual'nosti sistem upravleniya [Multialternativeness as a basis of security of intellectuality of control systems] [Text] / S.L. Podval'nyi`, T.M. Ledeneva // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2012. – T. 8. - № 11. - S.17-23.
8. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi` registratsii programmy dlya EVM № 2011612349. Programmnyi` kompleks «Predmetno-orientirovannaya sreda algoritmicheskogo modelirovaniya dinamiki nestatsionarnykh protsessov». [Program complex «Subject-oriented medium of algorithmic modelling of dynamics of nonstationary processes»] Pravoobladateli-avtory: Kaladze V.A., Gantseva E.A. Zaregistrovano v Reestre programm dlya EVM 21 marta 2011 g.
9. Kaladze V.A. Opisanie i ochenka sherohovatosti izdelii` metodami statisticheskoi` dinamiki [Exposition and estimation of a irregularities of products methods of statistical dynamics] [Text] / V.A. Kaladze, V.N. Shaposhnikov // Polzunovskii` vestnik. – Barnaul. - 2010. № 2. – S. 71-76.

СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАМКНУТОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НА ПЛАТФОРМЕ ANSYS WORKBENCH

Ю.А. Булыгин, А.В. Иванов, Д.Н. Галдин

В статье подробно описывается поэтапное создание параметрической оптимизационной математической трёхмерной модели рабочего колеса центробежного насоса в модуле ANSYS Design Modeler. Рассматривается модель с морфологическим типом преобразования геометрии с помощью функциональных зависимостей между отдельными элементами. В описываемой модели применяется большое количество параметров, число которых при необходимости можно ограничить. Для простоты построения меридианного сечения проточной части рабочего колеса используются такие элементы, как отрезки и дуги окружностей. При профилировании лопасти для задания средней линии применяется логарифмическая зависимость угла установки от радиуса, при этом в качестве параметров используются углы установки лопасти на входе и на выходе из рабочего колеса и радиусы начала и конца лопасти. Основными задачами, решаемыми с помощью построенной модели, являются повышение точности, снижение трудоемкости и продолжительности расчета, исключение влияния «человеческого» фактора. Разработанная параметризованная модель может применяться для проведения оптимизации практически любых центробежных насосных агрегатов, где используется рабочее колесо с цилиндрической формой лопасти

Ключевые слова: центробежный насос, параметрическое моделирование, оптимизация, ANSYS, гидродинамические процессы

Введение

Центробежные насосы (ЦН) широко распространены практически во всех областях промышленности. В частности, центробежные насосы применяются в системе питания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), при этом они во многом определяют основные характеристики и надежность ЖРД. Основные требования, предъявляемые к таким насосам, это достижение максимальной экономичности при минимальных массе и габаритах [1,2].

К настоящему времени было проведено значительное количество теоретических и экспериментальных исследований, которые показали, что ключевым элементом, определяющим основные характеристики центробежного насоса, является рабочее колесо - крыльчатка. Конечная геометрия крыльчатки ЦН существенно влияет на коэффициент полезного действия всего насоса.

Классические методики расчёта, применяемые для определения геометрии меридианного сечения и профиля лопасти, не всегда позволяют получить максимальную эффективность. Данные недостатки связаны с тем, что в ходе расчётов существует необходимость использовать значительно количество эмпирических и полуэмпирических коэффициентов в определённых диапазонах значений, что, в свою очередь влечёт за собой несовершенство формы рабочего колеса.

Современные компьютерные программы вычислительной гидрогазодинамики позволяют проводить численные эксперименты в трёхмерной постановке при высокой точности согласования с натурным экспериментом. Их использование предоставляет широкие возможности для проведения оптимизации энергетической эффективности насосного оборудования [3,4].

В качестве платформы для оптимизации может быть использована система конечно-элементного анализа ANSYS. Для этого используются следующие инструменты:

- ANSYS Design Modeler - для построения параметрической геометрической модели рабочего колеса –;
- ANSYS TurboGrid - для генерации подробной гексагональной сетки рабочего колеса;
- ANSYS CFX - для расчётов гидрогазодинамики ;
- Parameter Set – для задание входных параметров и сбора результатов расчётов;
- Response Surface Optimization и Direct Optimization – инструменты выполнения оптимизации;

В настоящей работе описывается первый этап выполнения задачи оптимизации, а именно создание параметризованной модели рабочего колеса ЦН.

Создание параметризованной модели проточной части рабочего колеса ЦН.

Построение модели проточной части рабочего колеса (ПК) в Design Modeler имеет ряд особенностей:

- 1) вращение ПК по умолчанию осуществляется только вокруг оси OZ;

Булыгин Юрий Александрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473)252-34-52, e-mail: bulyginu@gmail.com

Иванов Андрей Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, тел. 8(473) 234-64-84, e-mail: iav308@inbox.ru

Галдин Дмитрий Николаевич – ВГТУ, ассистент, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail: dmgaladin@yandex.ru

2) положительное направление расхода рабочего тела на входе в РК совпадает с направлением оси OZ ;

3) положительное направление вращения РК по часовой стрелке, со стороны входа в РК;

Геометрическое описание модели начинается с задания меридиональной проекции, причём обязательно использование следующих эскизов элементов: inlet – входная зона, outlet – выходная зона, hub – профиль основного диска, shroud – профиль покрывного диска. Построение эскизов производится на плоскости с именем MerPlane, образованной из плоскости ZXPlane.

Эскиз hub строится таким образом, что бы выполнялись вышеописанные условия, а именно выбираем для построения отрицательное направление по оси Z . Эскиз содержит две прямые линии и дугу окружности, на которую наложено ограничение касания к данным прямым. Задаётся расстояние от оси X до прямой 1, радиус проточной части на выходе из рабочего колеса, расстояние от оси Z до прямой 2, расстояние от входа РК до оси X и радиус дуги (эскиз hub представлен на рис. 1а). Эти размеры задаются параметрами с соответствующими именами L_{od} , $R2_{pr}$, D_{vh} , L_{vh} , R_{od} .

Эскиз Shroud содержит три прямые линии и дугу окружности, с ограничением касания прилегающих прямых. Размерами на эскизе задаётся расстояние от прямой 3 до оси Z , радиус дуги окружности, угол между прямой 4 и осью X , длина прямой 5 (эскиз Shroud представлен на рис. 1б). Данные размеры задаются параметром с соответствующими именами $R1$, R_{pd} , $angle_{pd}$, L_{pr} .

Эскиз Inlet содержит прямую линию между точками А и В, на которую наложено ограничение перпендикулярности оси Z (рис. 2). Эскиз Outlet содержит прямую линию между точками С и D, с ограничением параллельности оси Z (рис. 2). Длина линии задаётся параметром с именем $b2$.

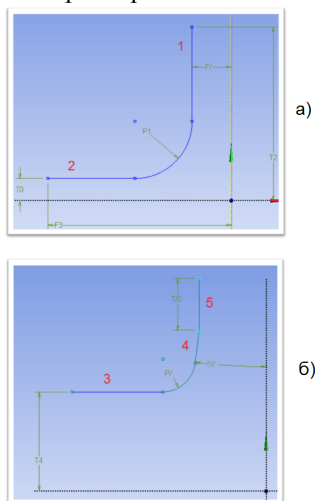


Рис. 1. Построение меридиональной проекции

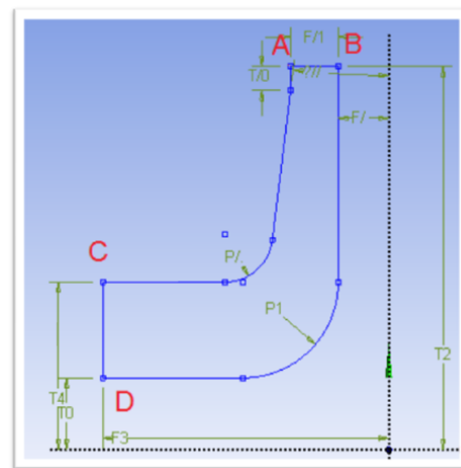


Рис. 2. Эскиз меридиональной проекции

На плоскости создан ещё один эскиз, на котором с помощью инструмента Duplicate скопированы все элементы с ранее созданных эскизов. На основе полученного эскиза применением операции Revolve вокруг оси Z формируется тело вращения (рис. 3)

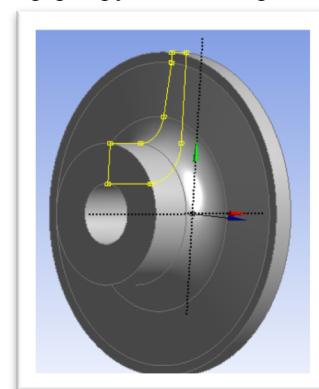


Рис. 3. Тело вращения по эскизу меридианного сечения

Для дальнейшего построения используется плоскость, построенная на базе плоскости XYPlane с условием изменения положительного направления оси Z . На этой плоскости создан скетч с вспомогательной геометрией. Создаётся 12 линий из начала координат, каждая из этих линий задаётся двумя параметрами, углом между прямой и осью X , а также длину данной прямой. Таким образом, получено 12 точек, заданных в полярной системе координат.

В окне Parameter Manager создаются новые параметры, содержащие необходимые вычисления для определения координат точек средней линии лопатки рабочего колеса, в полярной системе координат. Параметр с именем $Rad1$ расстояние от оси РК до входной кромки лопатки, $Rad2$ расстояние от оси РК до выходной кромки лопатки, $beta1$ угол установки лопатки на входе, $beta2$ угол установки лопатки на выходе. Данные параметры используются как входные. Дополнительно во вкладке Parameter/Dimension Assignments добавляются параметры, которые пред-

ставлены на рис. 4. Параметры r0 - r11 задают радиусы точек, а alfa1- alfa11 углы в полярных координатах. Углы α заданы следующим уравнением:

$$\alpha_i = \text{ctg}(\beta_1 \cdot (\ln(r_i) - \ln(Rad1)) + \frac{\text{ctg}(\beta_2) - \text{ctg}(\beta_1)}{\ln(Rad2) - \ln(Rad1)} \cdot \frac{(\ln(r_i) - \ln(Rad1))^2}{2}$$

где r_i – радиусы от r0 до r11.

r0	Rad1+0*(Rad2-Rad1)
r1	Rad1+0.1*(Rad2-Rad1)
r2	Rad1+0.2*(Rad2-Rad1)
r3	Rad1+0.3*(Rad2-Rad1)
r4	Rad1+0.4*(Rad2-Rad1)
r5	Rad1+0.5*(Rad2-Rad1)
r6	Rad1+0.6*(Rad2-Rad1)
r7	Rad1+0.7*(Rad2-Rad1)
r8	Rad1+0.8*(Rad2-Rad1)
r9	Rad1+0.9*(Rad2-Rad1)
r10	Rad1+1*(Rad2-Rad1)
r11	Rad1+1.1*(Rad2-Rad1)
alfa1	((1/tan(beta1))*((ln(r1)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r1)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa2	((1/tan(beta1))*((ln(r2)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r2)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa3	((1/tan(beta1))*((ln(r3)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r3)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa4	((1/tan(beta1))*((ln(r4)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r4)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa5	((1/tan(beta1))*((ln(r5)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r5)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa6	((1/tan(beta1))*((ln(r6)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r6)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa7	((1/tan(beta1))*((ln(r7)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r7)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa8	((1/tan(beta1))*((ln(r8)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r8)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa9	((1/tan(beta1))*((ln(r9)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r9)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa10	((1/tan(beta1))*((ln(r10)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r10)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415
alfa11	((1/tan(beta1))*((ln(r11)-ln(Rad1))+(1/tan(beta2)-1/tan(beta1))/(ln(Rad2)-ln(Rad1))))*((ln(r11)-ln(Rad1))^2/2)*180/3.1415

Рис. 4. Вспомогательные параметры

На данной плоскости создан ещё один эскиз, на котором был создан сплайн по полученным точкам и построены окружности с привязкой центров к ранее построенным точкам. Диаметр каждой из этих окружностей задан параметром с именем H_lopatki, который будет задавать толщину лопатки рабочего колеса. В каждой из этих окружностей создаётся прямая, перпендикулярная касательной к сплайну, проходящая через центр окружности. Так же была построена окружность с центром в начале координат с радиусом, заданным параметром Rad1.

Далее создаётся ещё один эскиз, который будет содержать 2 сплайна и 2 дуги окружности. Сплайны строятся по точкам пересечения окружностей и линий, перпендикулярных касательным. Построенный таким образом эскиз представлен на рис. 5.

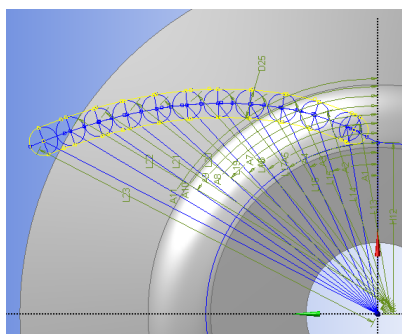


Рис. 5. Эскиз лопатки

Далее с помощью инструмента Extrude с параметрами Cut material создается геометрия лопатки рабочего колеса. После создания контура проточной части выполняем её генерацию с помощью инструмента FlowPath. В панели свойств ячейкам на жел-

том фоне присваиваются одноименные эскизы (скетчи), созданные ранее. Параметр Theta Direction задаёт направление потока, он может принимать значения Right handed или Left Handed. Здесь же создаются три дополнительные линии тока

Для дальнейшего импорта геометрии в модуль Turbo Grid использован инструмент Export Points, в котором задаётся геометрия лопатки и их количество. Количество лопаток задаётся параметром с именем N_blades.

В конечном итоге получена параметрическая модель секции проточной части рабочего колеса с параметрами, приведёнными в таблице и вариантами сеточных моделей секции проточной части приведённой на рис. 6.

Изменяемые параметры модели

Параметр	Значение
L_od	Расстояние от оси X до поверхности основного диска
R2_pr	Радиус РК на выходе
D_vh	Расстояние от оси вращения до начала проточной части на входе в РК
R_od	Радиус закругления на основном диске
L_vh	Расстояние от входа в РК до оси X
R1	Радиус входа в рабочее колесо
Angle_pd	Угол наклона на покрывном диске
R_pd	Радиус закругления на покрывном диске
L_pr	Длина сеточной модели на выходе из РК (вспомогательный параметр)
b2	Ширина лопатки на выходе
Rad1	Расстояние от оси вращения до входной кромки лопасти
Rad2	Расстояние от оси вращения до выходной кромки лопасти
beta1	Угол установки лопатки на входе РК
beta2	Угол установки лопатки на выходе РК
H_lopatki	Толщина лопатки
N_blades	Количество лопаток

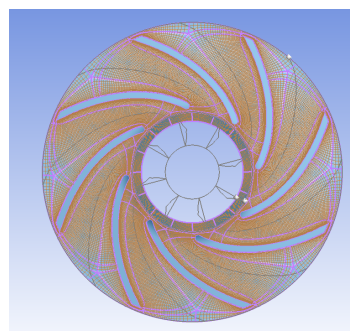


Рис. 6. Варианты рабочего колеса ЦН

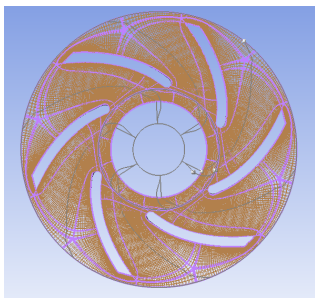


Рис. 6. Варианты рабочего колеса ЦН (продолжение)

Следует отметить, что помимо вышеописанного способа построения меридионального сечения существует способ построения с помощью сплайна. Используя операции аналогичные построению средней линии лопатки рабочего колеса возможно задание профиля основного и покрывного диска сплайнами.

Заключение

В рассмотренной модели используется большое количество параметров для дальнейшей оптимизации. Учитывая тот факт что, решаемая задача оптимизации относится к классу NP-полных задач, величина пространства поиска напрямую зависит от числа параметров. Исследования одновременно всех параметров является крайне затратным с точки зрения использования машинного времени, поэтому при решении необходимо определение степени вли-

яния того или иного параметра на показатели гидродинамической эффективности.

Основными задачами, решаемыми с помощью построенной модели, являются повышение точности, снижение трудоемкости и продолжительности расчета, исключение влияния «человеческого» фактора. Разработанная параметризованная модель может применяться для проведения оптимизации любых центробежных насосных агрегатов, где используется рабочее колесо с цилиндрической формой лопатки.

Литература

1. Иванов, А.В. Турбонасосные агрегаты кислородно-водородных ЖРД [Текст]: монография / А.В. Иванов / Воронеж: ГОУВПО «ВГТУ», 2011. - 284 с.
2. Автоматизированное проектирование центробежного насоса [Текст] : методическое пособие / С.С. Панаиотти [и др.]; под. ред. С.С. Панаиотти. – Калуга: КФ МГТУ, 2001. – 44 с.
3. Кретинин, А.В. Расчётный сравнительный анализ вариантов профилирования рабочего колеса центробежного насоса [Текст] / А.В. Кретинин, А.В. Иванов, Д.Н. Галдин / Вестник Воронежского государственного технического университета. -2016 Т. 12. - №4. С. 26-31
4. Кретинин, А. В. Нейросетевое моделирование гидродинамических процессов в центробежном насосе и нефтепроводе [Текст] / А. В. Кретинин, Ю. А. Булыгин, М. И. Кирпичев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». -2013. -№ 1. -С. 294-308

Воронежский государственный технический университет

CREATING A PARAMETRIC OPTIMIZATION MATHEMATICAL MODEL OF PUMP IMPELLER WITH HELP OF ANSYS WORKBENCH

Yu.A. Bulygin, Doctor of Science (Engineering), professor of Oil and Gas Equipment and Transportation Department of Voronezh State Technical University, full professor, Russian Federation, E-mail: bulyginu@gmail.com.

A.V. Ivanov, Doctor of Science (Engineering), Professor of Rocket Department of Voronezh State Technical University, associate professor, Russian Federation, E-mail: iav308@inbox.ru

D.N. Galdin, postgraduate student at the Oil and Gas Equipment and Transportation Department of Voronezh State Technical University, Russian Federation, E-mail: dmaldin@yandex.ru.

The article describes in detail the staged development of the parametric optimization model of the centrifugal pump in ANSYS Design Modeler module. In the considered model uses the morphological type of transformation geometry, using functional dependencies between the individual elements. In the described model uses a large number of parameters, which, if necessary, you can limit. The main tasks solved with the help of the constructed models are improving the accuracy, reducing the complexity and duration of calculation, elimination of the influence of "human factor". Developed a parameterized model can be applied to optimize centrifugal pumping units, which uses an impeller with cylindrical shape of the blade

Key words: centrifugal pump, impeller, ANSYS, hydrodynamic processes

References

1. Ivanov A.V. Turbonasosnye agregaty kislородно-водородnyh ZHRD: monografiya [Turbopump unit oxygen-hydrogen rocket engine: monograph] - Voronezh: GOUVPO «VGTU», 2011. - 284 p.
2. Panaiotti S.S. Avtomatizirovannoe proektirovanie centrobezhnogo nasosa: metodicheskoe posobie [Automated design of centrifugal pump: methodical manual] – Kaluga: KF MGTU, 2001. – 44 p.
3. Kretinin A.V., Ivanov A.V., Galdin D.N. Raschyotnyy sravnitelnyy analiz variantov profilirovaniya rabochego kolesa centrobezhnogo nasosa [Calculation comparison of variants for profiling centrifugal pump impeller] / Vestnik VGTU vol. 12 №4 – Voronezh.: VSTU 2016 pp 26-31
4. Kretinin A.V., Bulygin Yu.A., Kirpichev M.I. Nejrosetevoe modelirovanie gidrodinamicheskikh processov v centrobezhnom nasose i nefteprovoде [Neural network modeling of hydrodynamics processes in the centrifugal pump and oil pipeline] / electronic science journal « Neftegazovoe delo» -2013. -№ 1 – Ufa.: USPTU 2013 pp 294-308

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

С.И. Золотухин

Разработка сложной технической системы в настоящий момент не может обойтись без решения различного рода оптимизационных задач, размерность которых с ростом вычислительных мощностей также постоянно увеличивается. Настоящая статья посвящена синтезу оптимальной структуры энергетической системы перспективной гидравлической установки для обслуживания самолетов пятого поколения. Повышение их маневренных возможностей неизбежно влечет к увеличению рабочих давлений в гидроприводе. Экономия ресурса самолета осуществляется за счет отработки его гидравлической системы наземной гидравлической установкой. В связи с этим вопрос синтеза оптимальной структуры энергетической системы перспективной гидравлической установки является актуальным.

Автором статьи впервые применяется дифференцированная шкала относительной важности в комплексе с транспонированием матриц для получения правильного отображения локальных векторов приоритетности альтернатив, а также дополнительно вводится индекс достоверности с целью повышения точности локальных векторов приоритетов оценок экспертов. Введение дифференцированной шкалы относительной важности позволяет снизить элементы субъективности вытекающие из оценок экспертов, а транспонирование матриц позволяет в модификации метода, разработанной автором, решить в комплексе задачу максимизации и минимизации характеристик альтернатив по соответствующему критерию. Перед проведением оптимизации необходимо сформировать группу возможных вариантов альтернативных структур. Для решения данной задачи были применены элементы теории вероятности, а именно комбинации по сочетаниям.

В результате получена рациональная структура гидравлической установки, соответствующая варианту с электродвигателем и питанием от сети 380 В. В целом в рамках данной статьи решена важная задача структурного синтеза, положены основы для обоснования перспектив развития

Ключевые слова: оптимизация, энергетическая система, дифференциальная шкала относительной важности

Одной из важных задач, при обосновании структуры сложных технических систем является разработка методики, позволяющей произвести синтез возможных вариантов компоновки и выбрать наиболее оптимальную по ряду критериев, с учетом предпочтений лица принимающего решение (ЛПР) [1].

В данной статье рассматривается применение разработанного авторами методики синтеза оптимальной структуры энергетической системы перспективной гидравлической установки для обслуживания летательных аппаратов. Предметом исследования является гидравлическая установка. Объектом – её энергетическая система. Под энергетической системой гидравлической установки в данном случае понимается система, включающая все элементы преобразующие энергию от первоначального источника до потребителя.

На первоначальном этапе исследований происходит структурирование решаемой задачи, а именно её первой части – поиска всех возможных вариантов компоновки энергетической системы гидроустановки. На данном этапе применяется метод «дерева целей». Он основан на построении по иерархическому принципу совокупности целей системы, программы, в которой выделены генеральная цель; подчиненные ей подцели

первого, второго и последующего уровней (порядков) [2].

В данном случае «дерево целей» представляет собой граф, вершины которого представляются как элементы энергетической системы, а ребра или дуги – как связи между ними (рисунок 1). Такое описание целенаправленного поведения системы имеет два важных достоинства: универсальность и формализуемость [3].

Пусть имеется n различных объектов. Будем выбирать из них r объектов все возможными способами (то есть меняется состав выбранных объектов, но порядок не важен). Получившиеся комбинации называются сочетаниями из n объектов по r , их число равно [4]:

$$C_n^r = \frac{n!}{(n-r)!r!}. \quad (1)$$

Посчитаем количество сочетаний, возможных если при рассмотрении в качестве первоначального источника энергии взять электрическую сеть 380 В 50 Гц, соединенную с выпрямительным устройством и электродвигателем. Количество всех возможных сочетаний из перечисленных элементов по два элемента будет определяться по формуле:

$$C_3^2 = \frac{3!}{(3-2)!2!} = 3. \quad (2)$$

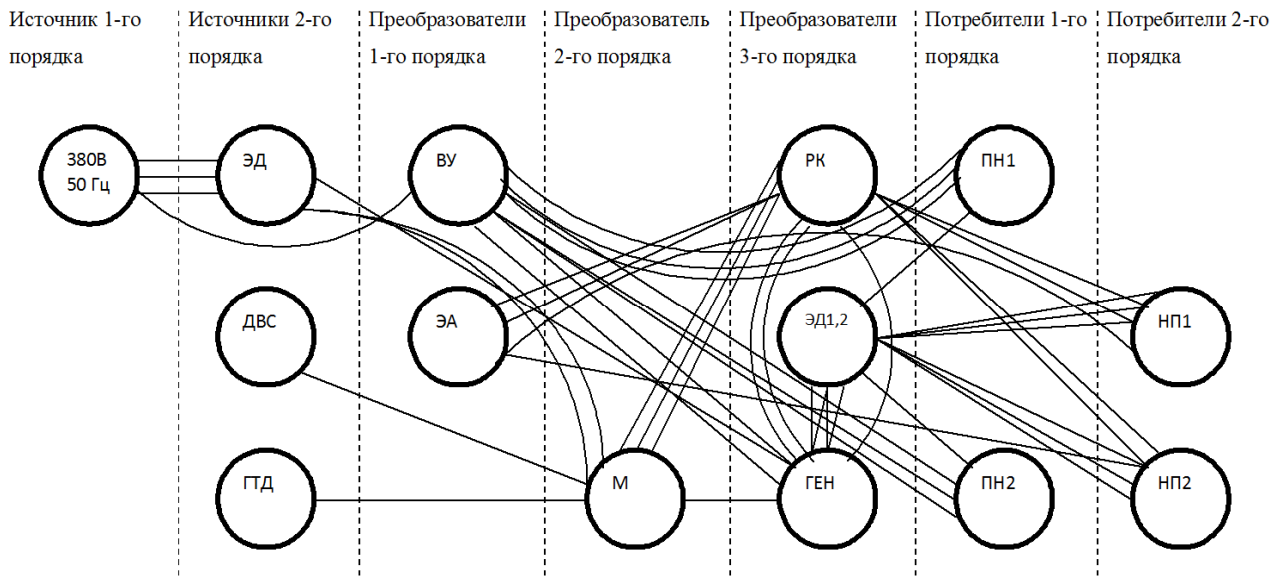


Рис. 1. Граф «дерева целей» множества вариантов компоновки энергетической системы гидравлической установки: 380 В – электрическая сеть, ЭД – электродвигатель, ДВС – двигатель внутреннего сгорания, ГТД – газотурбинный двигатель, ВУ – выпрямительное устройство, ЭА – энергоаккумулятор, М – муфта, РК – раздаточная коробка, ЭД1,2 – электродвигатель привода подкачивающего насоса, ГЕН – генератор, НП1,2 – насос аксиально-поршневой (основной насос), ПН1,2 – подкачивающий насос

Затем необходимо посчитать количество сочетаний между элементами, взаимосвязь между которыми не допустима:

$$C_{Исм.2-Пр.1_2}^2 = \frac{2!}{(2-2)!2!} = 1. \quad (3)$$

Теперь из первоначально полученных сочетаний необходимо исключить комбинации, которые не допустимы:

$$C_{Исм.1-Исм.2/Пр.1_4}^2 = \frac{3!}{(3-2)!2!} - \frac{2!}{(2-2)!2!} = 2. \quad (4)$$

Таким образом, получается два сочетания:
380В-ВУ;
380В-ЭД.

Аналогичным образом в результате проведенных вычислений, двигаясь от источников 1-го порядка к потребителям 2-го порядка, получили 26 вариантов компоновки или структуры энергетической системы гидроустановки:

380В(-ВУ-ПН)-ЭД-НП;
380В-ЭД-ГЕН(-ВУ-ПН1,2)-ЭД1,2-НП1,2;
380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-ГЕН-ЭД1,2-НП1,2;
380В-ЭД-М-ГЕН(-ВУ-ПН1,2)-ЭД1,2-НП1,2;
380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-М-ГЕН-ЭД1,2-НП1,2;
380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-М-РК-НП1,2;
380В-ЭД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
380В-ЭД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
380В-ЭД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
380В-ЭД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
380В-ЭД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;

380В-ЭД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ГТД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ГТД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ГТД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ГТД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ГТД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ГТД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ДВС-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ДВС-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ДВС-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ДВС-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ДВС-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ЭД1,2-ПН1,2;
ДВС-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-ВУ-ПН1,2;
ДВС-ГЕН(-ВУ-ПН1,2)-ЭД1,2-НП1,2;
ГТД-М-ГЕН(-ВУ-ПН1,2)-ЭД1,2-НП1,2.

Представленные варианты компоновки обладают различными характеристиками в связи с вариативностью, как элементов в структуре энергетической системы, так и самой организацией указанной структуры. Полученное разнообразие альтернативных вариантов компоновки энергетической системы гидроустановки позволяет обеспечить более широкую выборку для последующих исследований.

Проведя анализ множества полученных альтернатив и на основе заключений экспертов, принято решение убрать варианты структур, в которых происходит тройное преобразование энергии от её источника до потребителя, а также дублирование структур с незначительными отличиями [5]. В результате для проведения структурной оптимизации было представлено 11 альтернатив:

380В(-ВУ-ПН)-ЭД-НП;
 380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-М-РК-НП1,2;
 380В-ЭД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 380В-ЭД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 380В-ЭД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ГТД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ГТД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ГТД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ДВС-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ДВС-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
 ДВС-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2).

В качестве дальнейшего пути решения выбран метод анализа иерархий (МАИ), разработанный американским математиком Томасом Саати. Суть данного метода заключается в декомпозиции проблемы на более простые составляющие части [6]. Затем в выражении относительной степени (интенсивности) взаимодействия в иерархии, обработке в матрице парных сравнений показателей сравниваемых элементов на каждом уровне иерархии, а также обработке суждений лица, принимающего решение (ЛПР). И в заключении в формировании локальных приоритетов и нахождение глобального приоритета соответствующего оптимальному решению.

Выбранный метод анализа иерархии включает принцип идентичности и декомпозиции, дискриминации, сравниваемого суждения и синтезирования. Такой подход систематизирует процесс решения многокритериальной задачи.

Принцип идентичности и декомпозиции предусматривает структурирование задачи в виде иерархии или сети, что является первым этапом МАИ [7]. В общем виде иерархия строится из вершины – цели, промежуточных уровней – критериев, от которых зависят последующие уровни и самого низшего уровня – варианты, альтернативы (рис. 2).

В нашем случае на первом (высшем) уровне находится цель – структура. На втором уровне находится пять критериев (факторов), уточняющих цель, и на третьем уровне располагаются альтернативные варианты структур, которые будут оценены по отношению к критериям второго уровня. В результате будет выбрана оптимальная структура в соответствии с предложенными критериями и предпочтениями ЛПР.

Построив иерархию рассматриваемого вопроса, необходимо установить приоритеты критериев, оценить каждую из альтернатив и определить самую важную.

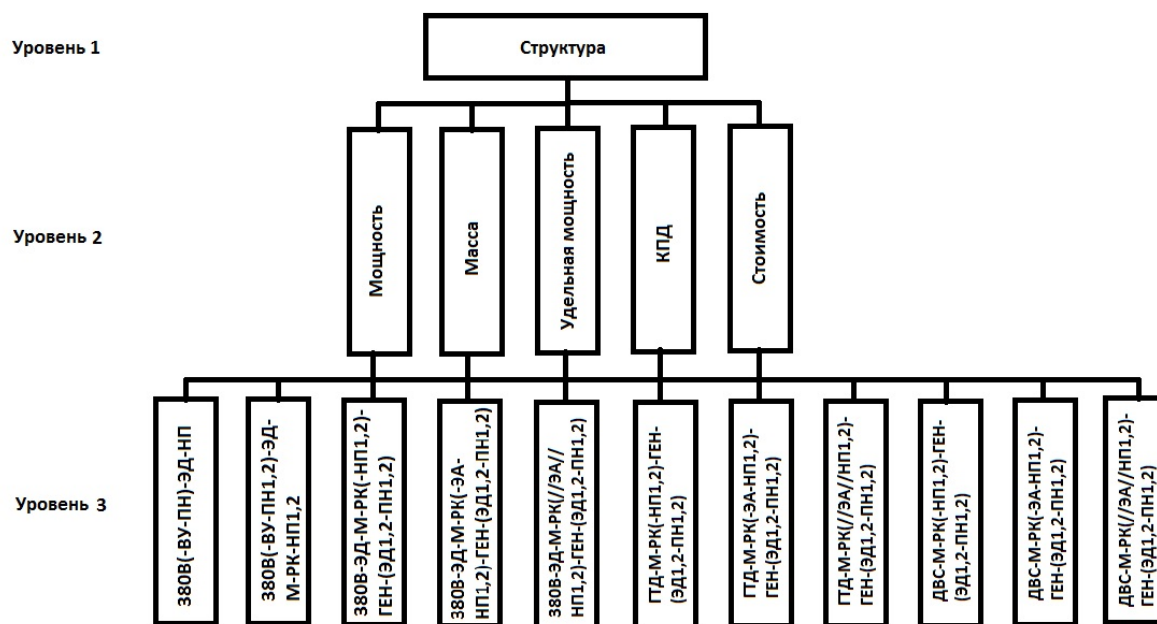


Рис. 2. Декомпозиция решаемой задачи на уровни и представление в виде доминантной иерархии

Сравним элементы задачи попарно по отношению к их воздействию («весу» или «интенсивности») на общую для них характеристику. Парные сравнения приведем к матричной форме типа:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для проведения субъективных парных сравнений Томасом Саати разработана шкала относительной важности. [8, 9].

Составляем матрицу парных сравнений 2-го уровня по пяти критериям. Коллективом экспертов

из пяти человек, согласно описанным в [8, 9] правилам были выставленные следующие оценки важности относительной величины (показателя, критерия), представленные на рис. 3.

	K1	K2	K3	K4	K5
K1	1	7	3	2	3
K2	1/7	1	1/2	1/3	1/4
K3	1/3	2	1	1/2	3
K4	1/2	3	2	1	1/3
K5	1/3	4	1/3	3	1

Рис. 3. Матрица парных сравнений 2-го уровня:
K1 – мощность, K2 – масса, K3 – удельная мощность,
K4 – КПД, K5 – стоимость

Аналогично на третьем уровне строится пять матриц, в которых производится оценивание превосходства одного варианта структуры энергетической системы над другим по конкретному показателю (характеристике) в соответствии с выбранным критерием. Однако здесь применим дифференцированную шкалу относительной важности рассмотренную в [10]. Для большей наглядности представим одну из таких матриц в следующем образе (рис. 4):

		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11
		148,96	148,96	144,16	144,16	144,16	161,16	161,16	161,16	204,9	204,9	204,9
B1	148,96	1,00	1,00	1,03	1,03	1,03	0,92	0,92	0,92	0,73	0,73	0,73
B2	148,96	1,00	1,00	1,03	1,03	1,03	0,92	0,92	0,92	0,73	0,73	0,73
B3	144,16	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89	0,70	0,70	0,70
B4	144,16	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89	0,70	0,70	0,70
B5	144,16	0,97	0,97	1,00	1,00	1,00	0,89	0,89	0,89	0,70	0,70	0,70
B6	161,16	1,08	1,08	1,12	1,12	1,12	1,00	1,00	1,00	0,79	0,79	0,79
B7	161,16	1,08	1,08	1,12	1,12	1,12	1,00	1,00	1,00	0,79	0,79	0,79
B8	161,16	1,08	1,08	1,12	1,12	1,12	1,00	1,00	1,00	0,79	0,79	0,79
B9	204,9	1,38	1,38	1,42	1,42	1,42	1,27	1,27	1,27	1,00	1,00	1,00
B10	204,9	1,38	1,38	1,42	1,42	1,42	1,27	1,27	1,27	1,00	1,00	1,00
B11	204,9	1,38	1,38	1,42	1,42	1,42	1,27	1,27	1,27	1,00	1,00	1,00

Рис. 4. Матрица парных сравнений 3-го уровня по мощности:
B1 – 380В(-ВУ-ПН)-ЭД-НП; B2 – 380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-М-РК-НП1,2; B3 – 380В-ЭД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
B4 – 380В-ЭД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2); B5 – 380В-ЭД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
B6 – ГТД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2); B7 – ГТД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
B8 – ГТД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2); B9 – ДВС-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2);
B10 – ДВС-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2); B11 – ДВС-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)

Оставшиеся 4 матрицы третьего уровня рассмотрим в общем виде:

а) матрица парных сравнений 3-го уровня по массе:

1	0,64	0,52	0,46	0,46	0,77	0,63	0,63	0,44	0,39	0,39
1,56	1	0,81	0,71	0,71	1,21	0,99	0,99	0,68	0,61	0,61
1,91	1,23	1	0,87	0,87	1,48	1,21	1,21	0,84	0,74	0,74
2,2	1,41	1,15	1	1	1,7	1,39	1,39	0,96	0,85	0,85
2,2	1,41	1,15	1	1	1,7	1,39	1,39	0,96	0,85	0,85
1,29	0,83	0,68	0,59	0,59	1	0,82	0,82	0,57	0,5	0,5
1,58	1,01	0,83	0,72	0,72	1,22	1	1	0,69	0,61	0,61
1,58	1,01	0,83	0,72	0,72	1,22	1	1	0,69	0,61	0,61
2,28	1,47	1,2	1,04	1,04	1,77	1,45	1,45	1	0,89	0,89
2,57	1,65	1,35	1,17	1,17	1,99	1,63	1,63	1,13	1	1
2,57	1,65	1,35	1,17	1,17	1,99	1,63	1,63	1,13	1	1

б) матрица парных сравнений 3-го уровня по удельной мощности:

1	0,66	0,36	0,25	0,25	0,16	0,13	0,13	0,27	0,21	0,21
1,52	1	0,55	0,38	0,38	0,24	0,2	0,2	0,42	0,32	0,32
2,79	1,83	1	0,7	0,7	0,44	0,37	0,37	0,76	0,58	0,58
3,97	2,6	1,42	1	1	0,63	0,53	0,53	1,09	0,82	0,82
3,97	2,6	1,42	1	1	0,63	0,53	0,53	1,09	0,82	0,82
6,32	4,14	2,27	1,59	1,59	1	0,84	0,84	1,73	1,31	1,31
7,5	4,92	2,69	1,89	1,89	1,19	1	1	2,05	1,55	1,55
7,5	4,92	2,69	1,89	1,89	1,19	1	1	2,05	1,55	1,55
3,65	2,39	1,31	0,92	0,92	0,58	0,49	0,49	1	0,76	0,76
4,83	3,17	1,73	1,22	1,22	0,76	0,64	0,64	1,32	1	1
4,83	3,17	1,73	1,22	1,22	0,76	0,64	0,64	1,32	1	1

в) матрица парных сравнений 3-го уровня по КПД:

1	1,56	1,98	2,27	2,27	1,2	1,46	1,46	1,66	1,87	1,87
0,64	1	1,27	1,45	1,45	0,77	0,94	0,94	1,06	1,2	1,2
0,5	0,79	1	1,14	1,14	0,6	0,74	0,74	0,84	0,94	0,94
0,44	0,69	0,88	1	1	0,53	0,65	0,65	0,73	0,82	0,82
0,44	0,69	0,88	1	1	0,53	0,65	0,65	0,73	0,82	0,82
0,84	1,3	1,66	1,89	1,89	1	1,22	1,22	1,39	1,56	1,56
0,68	1,07	1,36	1,55	1,55	0,82	1	1	1,14	1,28	1,28
0,68	1,07	1,36	1,55	1,55	0,82	1	1	1,14	1,28	1,28
0,6	0,94	1,19	1,36	1,36	0,72	0,88	0,88	1	1,12	1,12
0,54	0,84	1,06	1,21	1,21	0,64	0,78	0,78	0,89	1	1
0,54	0,84	1,06	1,21	1,21	0,64	0,78	0,78	0,89	1	1

г) матрица парных сравнений 3-го уровня по стоимости:

1	1,18	1,17	1,21	1,21	3,17	3,28	3,28	3,13	3,23	3,23
0,85	1	0,99	1,02	1,02	2,69	2,78	2,78	2,65	2,74	2,74
0,86	1,01	1	1,03	1,03	2,71	2,8	2,8	2,67	2,76	2,76
0,83	0,98	0,97	1	1	2,63	2,72	2,72	2,59	2,67	2,67
0,83	0,98	0,97	1	1	2,63	2,72	2,72	2,59	2,67	2,67
0,32	0,37	0,37	0,38	0,38	1	1,03	1,03	0,98	1,02	1,02
0,31	0,36	0,36	0,37	0,37	0,97	1	1	0,95	0,98	0,98
0,31	0,36	0,36	0,37	0,37	0,97	1	1	0,95	0,98	0,98
0,32	0,38	0,37	0,39	0,39	1,02	1,05	1,05	1	1,03	1,03
0,31	0,37	0,36	0,37	0,37	0,98	1,02	1,02	0,97	1	1
0,31	0,37	0,36	0,37	0,37	0,98	1,02	1,02	0,97	1	1

Матрицы 3-го уровня по критерию стоимости и массы необходимо транспонировать, так как они имеют в приоритете альтернативы с максимальными значениями характеристик (показателей). Другими словами в выигрыше самая дорогая и тяжелая структура. Для изменения приоритетности в сторону легкой и недорогой нам и понадобилось транспонирование. Из группы матриц 2-го и 3-го уровня с учетом транспонирования формируем набор векторов локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества элементов на элемент примыкающего сверху уровня. Рассмотрим расчет вектора локального приоритета из матрицы 2-го уровня. Для начала найдем компоненты векторов:

$$a := \sqrt[3]{1 \cdot 7 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3} = 2,63; \quad (6)$$

$$b := \sqrt[3]{1/7 \cdot 1 \cdot 1/2 \cdot 1/3 \cdot 1/4} = 0,36; \quad (7)$$

$$c := \sqrt[3]{1/3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1/2 \cdot 3} = 1,00; \quad (8)$$

$$d := \sqrt[3]{1/2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1/3} = 1,00; \quad (9)$$

$$e := \sqrt[3]{1/3 \cdot 4 \cdot 1/3 \cdot 3 \cdot 1} = 1,06. \quad (10)$$

Далее получаем нормированный к единице вектор приоритетов:

$$x_1 = \frac{a}{\Sigma(\text{компонент})} = 0,43; \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{b}{\Sigma(\text{компонент})} = 0,06; \quad (12)$$

$$x_3 = \frac{c}{\Sigma(\text{компонент})} = 0,17; \quad (13)$$

$$x_4 = \frac{d}{\Sigma(\text{компонент})} = 0,17; \quad (14)$$

$$x_5 = \frac{e}{\Sigma(\text{компонент})} = 0,18. \quad (15)$$

После этого умножаем матрицу парных сравнений 2-го уровня на нормированный вектор приоритетов и получаем локальный вектор приоритета:

$$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 2 & 3 \\ 1/7 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 \\ 1/3 & 2 & 1 & 1/2 & 3 \\ 1/2 & 3 & 2 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 4 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,43 \\ 0,06 \\ 0,17 \\ 0,17 \\ 0,18 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,20 \\ 0,30 \\ 1,04 \\ 0,95 \\ 1,11 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Аналогичным образом строятся локальные векторы приоритетов по пяти матрицам 3-го уровня.

Как указывалось выше, МАИ присущ принцип синтеза, который выражается в следующем: локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего критерия, стоящий на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критерием, на который воздействует этот элемент [11]:

$$\begin{bmatrix} 0,90 & 1,74 & 1,59 & 1,77 & 3,03 \\ 0,90 & 1,12 & 1,02 & 1,50 & 1,99 \\ 0,87 & 0,91 & 0,80 & 1,51 & 1,09 \\ 0,87 & 0,79 & 0,70 & 1,46 & 0,76 \\ 0,87 & 0,79 & 0,70 & 1,46 & 0,76 \\ 0,97 & 1,35 & 1,33 & 0,56 & 0,48 \\ 0,97 & 1,10 & 1,09 & 0,54 & 0,40 \\ 0,97 & 1,10 & 1,09 & 0,54 & 0,40 \\ 1,23 & 0,76 & 0,96 & 0,57 & 0,83 \\ 1,23 & 0,68 & 0,85 & 0,55 & 0,63 \\ 1,23 & 0,68 & 0,85 & 0,55 & 0,63 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 2,20 \\ 0,30 \\ 1,04 \\ 0,95 \\ 1,11 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,191 \\ 6,997 \\ 5,657 \\ 5,114 \\ 5,114 \\ 4,983 \\ 4,556 \\ 4,556 \\ 5,393 \\ 5,017 \\ 5,017 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Для более наглядного представления конечного результата рассмотрим фрагмент программы Microsoft Excel, в которой и производились все вычисления (рис. 5).

ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ полученных результатов показал превосходство варианта структур энергетической системы с электродвигателем и питанием от сети 380 В.

Представленная методика структурного синтеза, объединяющая в комплекс ряд методов: модифицированный метод анализа иерархий, элементы теории комбинаторного исчисления, метод «экспертных оценок» и «дерева целей» позволяет определить прогнозируемые

		Мощность, кВт Масса, кг Удельная мощность, кВт/кг КПД Стоимость, руб.					Обобщенный или глобальный приоритет
		K1	K2	K3	K4	K5	
		2,20	0,30	1,04	0,95	1,11	
380В(-ВУ-ПН)-ЭД-НП	B1	0,90	1,74	1,59	1,77	3,03	9,191
380В(-ВУ-ПН1,2)-ЭД-М-РК-НП1,2	B2	0,90	1,12	1,02	1,50	1,99	6,997
380В-ЭД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B3	0,87	0,91	0,80	1,51	1,09	5,657
380В-ЭД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B4	0,87	0,79	0,70	1,46	0,76	5,114
380В-ЭД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B5	0,87	0,79	0,70	1,46	0,76	5,114
ГТД-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B6	0,97	1,35	1,33	0,56	0,48	4,983
ГТД-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B7	0,97	1,10	1,09	0,54	0,40	4,556
ГТД-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B8	0,97	1,10	1,09	0,54	0,40	4,556
ДВС-М-РК(-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B9	1,23	0,76	0,96	0,57	0,83	5,395
ДВС-М-РК(-ЭА-НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B10	1,23	0,68	0,85	0,55	0,63	5,017
ДВС-М-РК(//ЭА//НП1,2)-ГЕН-(ЭД1,2-ПН1,2)	B11	1,23	0,68	0,85	0,55	0,63	5,017

Рис. 5. Матрица глобального приоритета

перспективы развития сложных технических систем. В данной работе в качестве примера рассматривалось решение оптимизационной задачи по поиску рациональной структуры энергетической системы гидравлических установок для обслуживания летательных аппаратов.

Предложенная методика является особенно эффективной на начальных этапах проектирования. Она позволяет разработчику оценить слабые места проекта, а инвестору определить свои потенциальные возможности по реализации.

В целом представленная методика позволяет решить важную задачу структурного синтеза, осуществить выбор наиболее рациональной альтернативы, обосновать перспективы развития.

Литература

1. Попов, С.И. Анализ современных методов и алгоритмов оптимизации на этапе формирования структуры и состава комплекса технических средств защиты информации на объекте информатизации [Текст] / С.И. Попов, Е.А. Рогозин, С.Ю. Рослов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. - № 6. - С. 83-85.
2. Селюков, М.В. Процесс постановки целей в системе менеджмента организации [Текст] / М.В. Селюков // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 3
3. Студопедия [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://studopedia.ru/3_172445_metod-derevatsley.html (дата обращения 02.06.2016).

4. Бродский, Я.С. Статистика. Вероятность. Комбинаторика [Текст] / Я.С. Бродский. – М.: ООО «Издательство «Мир и Образование», 2008. – 544 с.

5. Верескун, В.Д. Экспертные оценки в производственно-транспортных процессах: вопросы организации, моделирования и управления [Текст] / В.Д. Верескун // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4-3. – С. 485-489.

6. Оценка перспективности гидроэнергетического строительства в регионах РФ на основе метода анализа иерархий [Текст] / Н. В. Баденко и др. // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – №4(48). – С. 39-48.

7. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем [Текст] / Т. Саати, К. Кернс; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

8. Саати, Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях [Текст] / Т. Саати // Аналитические сети. – М.: Либроком, 2011. – 357 с.

9. Малин, А.С. Исследование систем управления [Текст]: учебник для вузов / А.С. Малин, В.И. Мухин. – М.: ГУ ВШУ, 2002. – 400 с.

10. Золотухин, С.И. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов альтернатив при синтезе оптимальной структуры энергетической системы гидравлической установки [Текст] / С.И. Золотухин, М.Ю. Синёв, А.О. Шмойлов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-2. – С. 284-290.

11. Методология создания информационно-аналитической системы учета и контроля использования интеллектуальной собственности [Текст] / А.А. Морозов и др. // Математические машины и системы. - 2004. – № 2. - С. 114-133.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

SYNTHESIS OF OPTIMAL STRUCTURE OF THE ENERGY SYSTEM LONG-TERM HYDRAULIC SYSTEMS

S.I. Zolotukhin, graduated, Military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vaiu@mil.ru

Development of complex technical system at the moment can not do without solving various optimization problems. The dimension that with the growth of computing power and is constantly increasing. This article focuses on the synthesis of the optimal structure of the energy system perspective hydraulic system for maintenance fifth-generation aircraft. Increasing their maneuvering capabilities inevitably leads to an increase in working pressure in the hydraulic drive. Saving resource aircraft carried out by mining its hydraulic system ground hydraulic unit. In this connection the question of synthesis of the optimal structure of the energy system perspective the hydraulic system is important.

The author of the article for the first time applies a differentiated scale of relative importance in the complex transposition of matrices to obtain the correct display of local alternatives to priority vectors, and additionally introduces reliability index to improve the accuracy of local priority vectors expert evaluations. The introduction of the relative importance of scale reduces the differentiated elements of subjectivity arising from expert evaluations, and the transposition of matrices allows modification of the method developed by the author to solve the complex task of maximizing performance and minimizing alternatives under the relevant criteria. Before the optimization necessary to form a group of possible options for alternative structures. To solve this problem we have been applied elements of probability theory, namely the combination in combinations.

The result is a rational structure of the hydraulic system according to an embodiment with an electric motor and the power supply of 380 V. In general, in this article solved an important problem of structural synthesis, laid the foundations for the study of development prospects

Key words: optimization, energy system, differential scale of relative importance

References

1. Popov S.I., Rogozin E.A., Roslov S.YU. Analiz sovremennykh metodov i algoritmov optimizatsii na etape formirovaniya struktury i sostava kompleksa tekhnicheskikh sredstv zashchity informatsii na ob'ekte informatizatsii [Analysis of modern methods and algorithms for optimization at the stage of formation of the structure and composition of the technical means of information protection in the information of the object]// Vestnik VGTU. – 2009. – T. 5. № 6. S. 83-85.
2. Selyukov M.V. Process postanovki celej v sisteme menedzhmenta organizatsii [The process of setting the organization management system goals]// Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2011. – № 3
3. Studopediya – Rezhim dostupa: http://studopedia.ru/3_172445_metod-dereva-tseley.html (data obrashcheniya 02.06.2016).
4. Brodskij YA.S. Statistika. Veroyatnost'. Kombinatorika. [Statistics. Probability. Combinatorics.] – Moskva: OOO «Izdatel'stvo «Mir i Obrazovanie», 2008. – 544 s.
5. Vereskun V.D. EHkspertnye ocenki v proizvodstvenno-transportnykh processakh: voprosy organizatsii, modelirovaniya i upravleniya [Expert evaluation of production and transport processes: organization, Modelling and Management]// Fundamental'nye issledovaniya. – 2016. – № 4-3. – S. 485-489.
6. Badenko N. V. i dr. Ocenka perspektivnosti gidroenergeticheskogo stroitel'stva v regionah RF na osnove metoda analiza ierarhij [Assessment of the prospects of the hydropower construction in the regions of Russia on the basis of the analytic hierarchy process]// Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2014. – №4(48). – S. 39-48.
7. T. Saati, K. Kerns Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya sistem [Analytical planning. systems Organization] – Moskva: Izdatel'stvo «Radio i svyaz', 1991. – 224 s.
8. Saati T.L. Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnykh svyazyah [Decision-making at the dependencies and feedbacks]// Analiticheskie seti. – Moskva: Librokom, 2011. – 357 s.
9. Malin A.S., Muhin V.I. Issledovanie sistem upravleniya [Research of management systems]// Uchebnik dlya vuzov. – Moskva: GU VSHU, 2002. – 400 s.
10. Zolotuhin S.I., Sinyov M.YU., SHmojlov A.O. Modifikatsiya metoda analiza ierarhij T. Saati dlya rascheta vesov al'ternativ pri sinteze optimal'noj struktury ehnergeticheskoy sistemy gidravlicheskoj ustanovki [Modification of hierarchies analysis method T. Saaty for calculating weights of alternatives in the synthesis of the optimal structure of the energy system of the hydraulic system]// Fundamental'nye issledovaniya. – 2016. – № 12-2. – S. 284-290
11. Morozov A.A. i dr. Metodologiya sozdaniya informacionno-analiticheskoy sistemy ucheta i kontrolya ispol'zovaniya intellektual'noj sobstvennosti [Methodology of creation of information-analytical intellectual property registration and control of use of the system]// Matematicheskie mashiny i sistemy. 2004. – № 2. S. 114-133.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТИРИСТОРНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.Н. Крысанов, К.В. Иванов

В статье рассматриваются типовые потребители реактивной мощности в составе промышленных предприятий, приводятся их суточные графики нагрузки в соответствии с производственным процессом. Функционально описывается автоматизированная система управления электрохозяйством, описываются критерии адаптации устройств компенсации реактивной мощности (конденсаторных установок) к автоматизированной системе управления электрохозяйством. В соответствии с задачей адаптации поднимается проблематика элементов коммутации конденсаторных батарей. Проводится анализ различных вариантов подключения конденсаторных установок к сети и предлагается альтернативный вариант. Приводится расчет номинального тока батареи статических конденсаторов и определение количества коммутаций в соответствии с типовым графиком нагрузки. По рассчитанному значению номинального тока производится подбор силовых элементов, необходимых для конденсаторной установки, из современной полупроводниковой элементной базы. В заключении составляется сравнительная таблица ценовых характеристик и срока службы ранее подобранного оборудования. В соответствии с удельной стоимостью 1 кВАр рассчитывается экономический эффект от применения различных способов подключения конденсаторной батареи. Проводится сравнение, в ходе которого устанавливается, что оптимальным способом по критерию «цена-качество-надежность» является использование тиристорной группы в режиме кратковременной перегрузки совместно с твердотельным реле

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, тиристорные конденсаторные установки

Основным и ключевым элементом эффективного функционирования систем энергоснабжения регионального уровня является

автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления распределительных сетевых компаний (АС РСК).

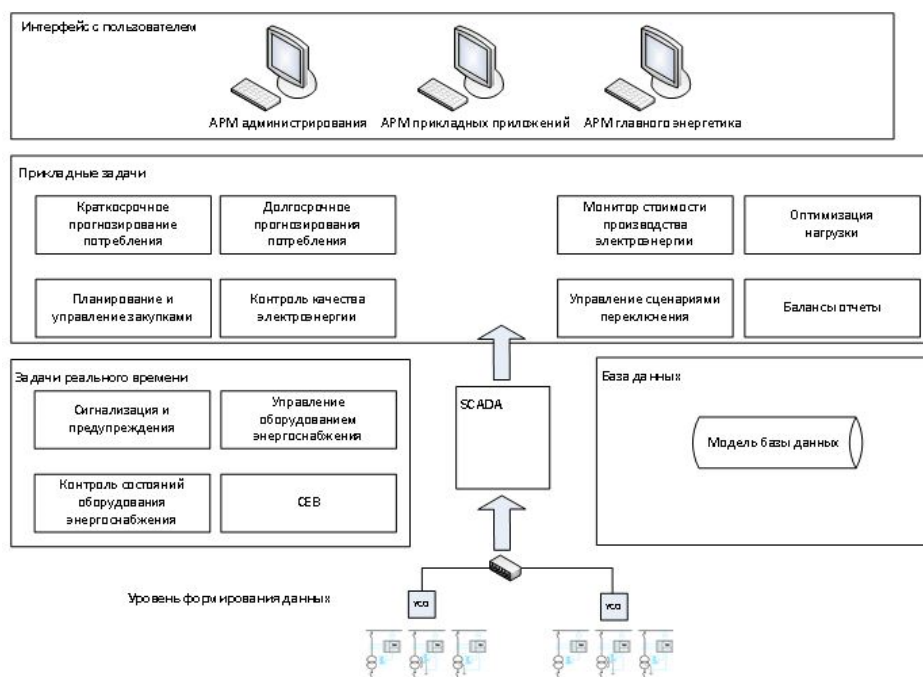


Рис. 1. Функциональная модель АСУЭС

Она непосредственно связана с автоматизированными системами управления электрохозяйством (АСУ СЭС) отдельных промышленных и жилищно-коммунальных

объектов. Обычно используется функциональная модель АСУЭС, приведенная на рис. 1.

Коротко отметим ее основные функции:

- определение потребности в ресурсах и планирование их расхода по видам деятельности предприятия;

- управление производством, распределением и потреблением энергоресурсов;

Крысанов Валерий Николаевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: sovteh2000@mail.ru
Иванов Константин Владимирович – ВГТУ, аспирант, e-mail: Dharma_lost@bk.ru

- анализ расхода энергетических ресурсов и затрат на их производство;
- контроль состояния оборудования;
- организация и управление техобслуживанием и ремонтом энергетического оборудования;
- диагностика энергооборудования;
- передача информации в смежные системы автоматизации.

Учитывая, что АСУСЭС работает в режиме реального времени, то для эффективной работы блока «Управление оборудованием электроснабжения» (в состав которого входят и аппаратные средства компенсации реактивной мощности КРМ), необходимо обеспечить соответствие технических параметров устройств КРМ (как минимум, по быстродействию и надежности) требованиям управляющих команд от АСУСЭС. Уточним эти требования на примере

типовых электропотребителей промышленных предприятий.

В сфере промышленной электроэнергетики существует множество потребителей реактивной энергии. К таким потребителям относятся, прежде всего, металлургические заводы, химические предприятия, предприятия электрохимической обработки металлов и драгоценных камней, предприятия, имеющие электродуговую и контактную сварку, обычные предприятия, использующие для освещения газоразрядные лампы, предприятия нефтяной, газовой и угольной отраслей, предприятия, имеющие электродвигатели различного типа.

Одним из потребителей реактивной мощности в составе промышленного предприятия является компрессорная установка. Она обеспечивает выработку сжатого воздуха для нужд предприятия. На рис.2 представлен типовой график нагрузки компрессорной установки в ночное время суток [1].

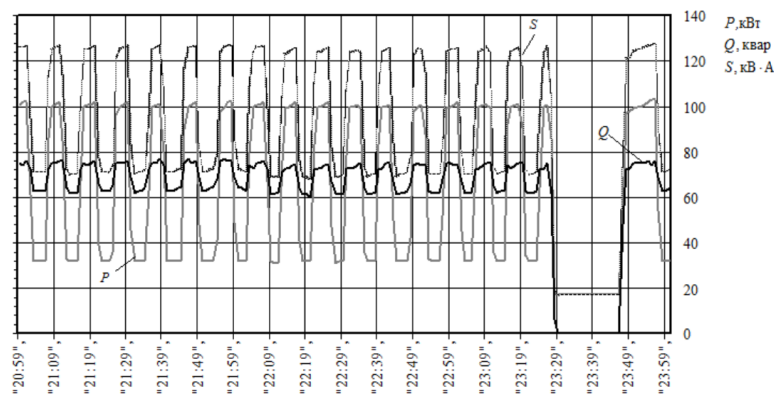


Рис. 2. График нагрузки компрессорной установки

Как видно из рис. 2, количество коммутаций за сутки может достигать 144, однако реактивная мощность, потребляемая компрессорной установкой, изменяется от 60кВАр до 80кВАр и только раз понижается до 0, соответственно потребление реактивной мощности происходит почти постоянно.

Также в качестве потребителя реактивной мощности рассмотрим насосную станцию водоподготовки и очистки крупного промышленного предприятия. График среднесуточного технологического потребления воды предприятия представлен на рис. 3.

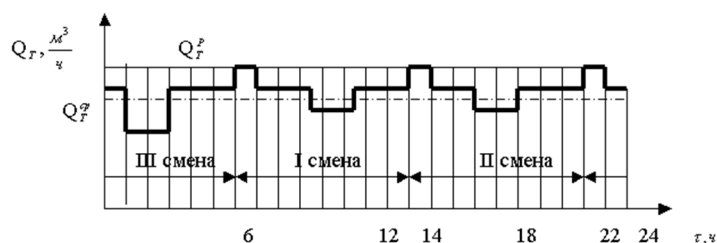


Рис. 3. График среднесуточного технологического потребления воды промышленного предприятия

Необходимо компенсировать реактивную мощность, создаваемую индуктивной составляющей активно-индуктивной нагрузки мощностью 100кВАр в каждой фазе. В течение рабочего дня насосная станция для обеспечения нужд предприятия согласно графику, представленному на рис. 3, включается и

отключается (в среднегодовом выражении), как минимум, 100 в день. Соответственно, количество коммутаций установки КРМ, желательно реализовать на том же уровне.

Ниже будет проведен технико-экономический анализ существующих аппаратных решений КРМ, которые могут быть

адаптированы в АСУ СЭС промышленных предприятий.

Самым слабым местом наиболее распространенных установок КРМ являются элементы коммутации конденсаторных батарей (КБ) ввиду их ограниченного ресурса. Одним из самых распространенных способов коммутации конденсаторов является использование контактора. При выборе контактора для этих целей необходимо учитывать номинальное напряжение, рабочий ток контактов.

По заданным параметрам рассмотрим магнитный пускатель LC1E300M5 фирмы SchneiderElectric. Данный пускатель имеет 3 силовых контакта, рассчитан на номинальный ток 300 А и номинальное напряжение 690 В, может выдержать ток перегрузки 2200 А в течение 10 секунд. Механическая износостойкость контактов составляет 5 млн. циклов, а электрическая износостойкость 0,5 млн. циклов при применении по категории AC-3 [2]. Стоимость пускателя 22500 р.

Также рассмотрим магнитный пускатель Siemens 3RT10656AP36, имеющий 3 полюса. Номинальный ток пускателя 265А, номинальное напряжение 400В. Заявленный ресурс составляет 5 млн. циклов [3]. Стоимость данного магнитного пускателя 35000р.

Вторым способом коммутации конденсаторов является использование тириستоров, включенных встречно-параллельно. Для правильного выбора вентиляных ключей необходимо учесть параметры коммутируемого тока. В первую очередь частота коммутируемого тока должна соответствовать частоте, для работы на которой предназначен клапан. При коммутации через тиристор протекает ток, значение которого по абсолютной величине определяется по формуле:

$$I = \frac{U}{X_C} = U \cdot 2\pi \cdot f \cdot C = 263 \text{ А}$$

Вторым важным параметром является обратное напряжение, выдерживаемое клапаном. При использовании клапанов в сетях 0,4кВ, выдерживаемое обратное напряжение должно быть не менее 400В.

Итак, при выборе тиристора необходимо, чтобы его параметры соответствовали следующим условиям:

— частота коммутируемого напряжения 50 Гц;

— прямой ток $\geq 263 \text{ А}$;

— обратное напряжение $\geq 400 \text{ В}$.

Широкий ассортимент современных силовых полупроводниковых клапанов позволяет выбрать готовый силовой блок, состоящий из нескольких клапанов, подходящий по полученным выше параметрам. Такие блоки

имеют высокую стоимость. Вторым решением данной проблемы выбора клапанов является сборка силового блока из нескольких клапанов, рассчитанных на данное напряжение. Соединив параллельно несколько клапанов так, чтобы суммарный коммутируемый ток был равен требуемому значению, получим силовой блок. Но тогда дополнительные затраты придется на создание охлаждающей системы для данного блока. В частности, при проблеме выбора готового блока или собранного из нескольких клапанов, в каждом конкретном случае необходимо принимать экономически целесообразное решение.

Для заданных условий выберем силовой тиристор VS-VSKH320 производства фирмы Vishay со значением максимально допустимого среднего тока 320 А, минимальным значением обратного напряжения 1200 В, значением ударного тока в открытом состоянии в течение времени 10 мс, не более, 9кА [4]. Стоимость силового блока из тиристора и обратного диода составляет примерно 17350 р.

Еще один способ подключения конденсаторной батареи к сети заключается в использовании для этих целей контактора совместно с силовыми тиристорами [5,6].

Основными параметрами при выборе контактора остаются номинальный ток и рабочее напряжение контактов. При таком способе коммутации пускатель будет работать в облегченных режимах за счет применения тиристоров, и можно считать, что он выработает весь срок службы.

Применяя вышеописанный способ коммутации конденсаторной батареи, резко снижаются требования к тиристорам по максимальному току. Благодаря тому, что тиристор кратковременно может работать в режиме перегрузки, есть возможность снизить значение установленной мощности. Рассмотрим силовой тиристор VS-VSKT41 производства фирмы Vishay со значением максимально допустимого среднего тока 45 А, минимальным значением обратного напряжения 400 В, значением ударного тока в открытом состоянии в течении времени 10 мс, не более, 850 А [7]. На рис. 4 приведена зависимость величины тока перегрузки от времени воздействия импульса тока перегрузки. В нашем случае переходный процесс будет длиться 100 мс. Исходя из рис.4, максимальный ток перегрузки в течение 100 мс составит около 450 А, что достаточно для наших условий. Стоимость силового блока из тиристора и диода составляет примерно 4000 р.

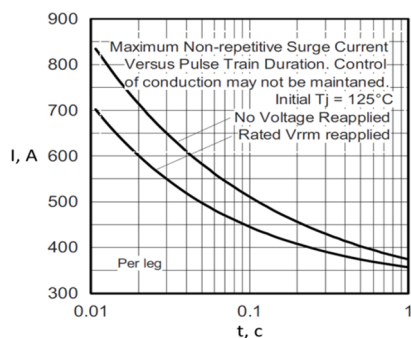


Рис. 4. Максимальная кратковременная перегрузка по току VS-VSKT41

Также рассмотрим тиристор фирмы Еурес модель TD61N. Данный тиристор рассчитан на работы при обратном напряжении 1200В, максимальном среднем токе 60А, ударном токе в открытом состоянии в течение времени 10 мс, не более, 1550А. На рис. 5 изображена перегрузочная характеристика данного тиристора. Основываясь на рис. 5, минимальное значение тока перегрузки в течение 100 мс, которое сможет выдержать тиристор, равно 500А. Стоимость данного тиристора 5800р.

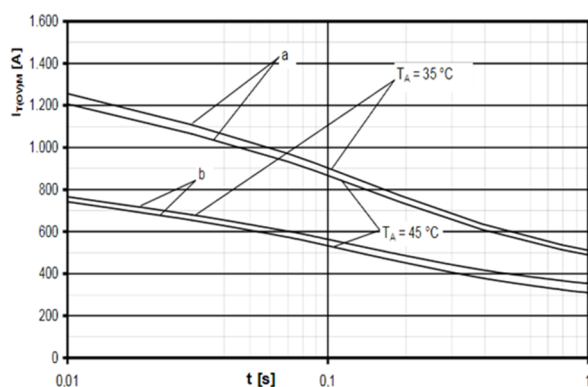


Рис. 5. Максимальная кратковременная перегрузка по току TD61N

Благодаря бурному развитию полупроводниковой техники в последние годы, на рынке представлен еще один перспективный вариант элемента коммутации - твердотельное реле. Твердотельное реле — электронное устройство, являющееся типом реле без механических движущихся частей, служащее для включения и выключения силовых цепей с помощью низких напряжений, подаваемых на клеммы управления. Твердотельное реле содержит датчик, который реагирует на вход (управляющий сигнал) и твердотельную электронику, включающую силовую цепь. Этот тип реле может использоваться в сетях постоянного и переменного тока. Устройство применяется для тех же функций, что и обычное реле, но не содержит движущихся частей.

Большинству твердотельных реле свойственно однозначное превосходство над электромеханическими реле:

- меньшие размеры, позволяющие создавать более компактные устройства;
- полная бесшумность работы;
- гальваническая развязка цепей управления благодаря оптрону;
- увеличенный срок службы благодаря отсутствию движущихся частей;
- выходное сопротивление не меняется во время всего срока службы;
- отсутствие скачка напряжения при переключении;
- отсутствие искры, что позволяет использовать устройство на взрыво- и пожароопасных объектах;
- меньшая чувствительность к внешним условиям, вроде вибраций и магнитных полей [8].

К минусам твердотельных реле можно отнести высокую стоимость, однако срок их службы гораздо дольше, чем у электромагнитных.

Выбирается твердотельное реле по рабочему напряжению, рабочему току через контакты, а также управляющему напряжению. Для нашего устройства необходимо: рабочее напряжение — более 400 В, рабочий ток через контакты — более 263 А, управляющее напряжение — не более 5 В, для прямой совместы с микроконтроллером, без необходимости дополнительных источников питания.

По заданным параметрам рассмотрим трехфазное твердотельное реле фирмы Greego SSR модель GDM29048ZD3 [9]. Его параметры полностью отвечают предъявляемым требованиям: рабочее напряжение — 480 В, рабочий ток — 290 А, управляющее напряжение — 3-32 В постоянного тока, напряжение включения — 3 В, напряжение отключения — 1,5 В. Его стоимость составляет примерно 6500 р.

Также следует рассмотреть твердотельное реле NCR NHG1A-1. Оно имеет три силовых контакта для коммутации, а также 2 дополнительных сигнальных контакта. Данное реле рассчитано на рабочее напряжение 440 В, рабочий ток — 300 А. Управление реле осуществляется подачей сигнала 3-32В постоянного тока на управляющие выводы, причем напряжение включения — 3В, выключения —1В. Стоимость твердотельного реле составляет 3000 р [10]. Отметим, что для функционирования такого КРМ необходима специальная СУ, реализующая соответствующий алгоритм работы всех элементов установки [11].

Экономический эффект применения описанных выше КРМ приведен в таблице ниже.

Способ коммутации	Общая стоимость, р	Удельная стоимость 1 кВАр, р/кВАр	Срок службы, лет	Экономия, р/кВАр
Контактор	22500	225	Не менее 13	0
Тиристоры	34700	347	Не ограничен	-122
Тиристоры и контактор	30500	305	Не менее 100	-80
Тиристоры и твердотельное реле	11000	110	Не ограничен	115

В соответствии с вышеизложенным, можно сделать вывод о возможности эффективного применения устройств КРМ на основе КБ в АСУ СЭС многих энергоёмких промышленных предприятий. При этом необходимо реализовать специальный алгоритм подключения КБ и силовую часть на основе оптимальной схемы полупроводниковых ключей.

Литература

1. Крюков, А.В. Моделирование систем электроснабжения [Текст]: учебное пособие / А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 142 с.
2. Schneiderelectric: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.schneider-electric.ru/ru/>. (Дата обращения: 10.11.2016).
3. SIEMENS 3RT1065 Контакторы: [Электронный ресурс]. // Промышленная автоматика. URL: <http://www.proavtomatika.ru/contactorsiemens/3rt10/3rt1065.htm>. (Дата обращения: 11.11.2016).
4. VS-VSKH320-16PbF Series: [Электронный ресурс]. // Vishay Semiconductors. URL: <http://www.vishay.com/docs/94667/vs-vskh32016pbf.pdf>. (Дата обращения: 12.11.2016).

5. Крысанов В.Н. Устройство подключения конденсаторных батарей [Текст] / В.Н. Крысанов // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Всерос. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2009.

6. Алиева Л.Ф., Крысанов В.Н., Рубин Я.С., Быков В.Е. Авторское свидетельство СССР, No 909755, кл. H 02 J 7/10, 1980.

7. VS-VSK.41..., VS-VSK.56.. Series: [Электронный ресурс]. // Vishay Semiconductors. <http://www.vishay.com/docs/94630/vs-vsk4156.pdf>. (Дата обращения: 13.11.2016).

8. Твердотельное реле: [Электронный ресурс]. // Википедия. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5>

9. SCR output Single phase SSR (200 to 400A): [Электронный ресурс]. // GREEGOO. URL: http://www.greegoo.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html. (Дата обращения: 14.11.2016).

10. Solid State Relay HHG1A-1 (SSR-DA): [Электронный ресурс]. // Nicerelay. <http://www.nicerelay.com/eWebEditor/UploadFile/2014113171826126.pdf>.

11. Крысанов В.Н. Оптимизация способов подключения конденсаторной батареи [Текст] / В.Н. Крысанов, А.В. Демихов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009/4. – С. 53-58.

Воронежский государственный технический университет

THE POSSIBILITY OF USING THYRISTOR SWITCHED CAPACITOR IN AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF POWER GRID OF INDUSTRIAL ENTERPRISES FOR COMPENSATING REACTIVE POWER

V.N. Krysanov, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sovteh2000@mail.ru

K.V. Ivanov, graduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Dharma_lost@bk.ru

The article considers typical industry consumers of reactive power as a part of industrial enterprises, given their daily load curves in accordance with the production process. Functionally describes an automated control system of power grid, describes the criteria for adaptation of reactive power compensation devices (capacitor banks) in the adapted to automated control system of power grid. In accordance with the task of adaptation the problems of capacitor banks switching elements raised. It analysis connectivity options of capacitor banks to the power grid and offers an alternative. It gives calculation of nominal current of static capacitor bank and determination of the number of commutations in accordance with the standard load curve. According to the calculated value of the rated current selection of necessary to a capacitor bank power components is made of the modern semiconductor components. In conclusion compiled a comparative table of price performance and service life of the previously chosen equipment. In accordance with a specific value of 1 kVAh calculated economic benefit from the use of different ways to connect the capacitor bank. A comparison in which it is established that the best way to the

criterion of "price-quality-reliability" is the use of thyristor group short-term overload conditions, together with a solid state relay

Key words: compensating reactive power, thyristor switched capacitor

References

1. Krjukov, A.V. Modelirovanie sistem jelectrosnabzhenija: uchebnoe posobie [Simulation systems of power supply: tutorial] // Irkutsk: IrGUPS, 2014. – 142 p.
2. Schneiderelectric: [Electronic resource]. URL: <http://www.schneider-electric.ru/ru/>.
3. SIEMENS 3RT1065 Kontaktory [Contactors]: [Electronic resource]. // Promyshlennaja avtomatika. URL: <http://www.proavtomatika.ru/contactor/siemens/3rt10/3rt1065.htm>.
4. VS-VSKH320-16PbF Series: [Electronic resource]. // Vishay Semiconductors. URL: <http://www.vishay.com/docs/94667/vs-vskh32016pbf.pdf>.
5. Krysanov V.N. Ustrojstvo podkljuchenija kondensatornyh batarej [Device connected capacitor banks] // New technologies in science researches, design, control, production: conference – Voronezh: Voronezh. gos. tehn. un-t, 2009.
6. Alieva L.F., Krysanov V.N., RubinJa.S., Bykov V.E. Avtorskoe svidetel'stvo [Copyright certificate] SSSR, No 909755, kl. N 02 J 7/10, 1980.
7. VS-VSK.41.., VS-VSK.56.. Series: [Electronic resource]. // Vishay Semiconductors. <http://www.vishay.com/docs/94630/vs-vsk4156.pdf>.
8. Tverdotel'noe rele [Solid state relay]: [Electronic resource]. // Vikipedija. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5
9. SCR output Single phase SSR (200 to 400A): [Electronic resource]. // GREEGOO. URL: http://www.greegoo.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html.
10. Solid State Relay HHG1A-1 (SSR-DA): [Electronic resource]. // Nicerelay. <http://www.nicerelay.com/eWebEditor/UploadFile/2014113171826126.pdf>.
11. Krysanov V.N. Optimizacija sposobov podkljuchenija kondensatornoj batarei [Optimization of ways to connect capacitor banks] // Electrical complexes and control systems. – Voronezh, 2009/4. – p. 53-58.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЛИМЕРНЫХ ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВРЕМЯ ПОЖАРА

А.М. Чуйков, А.В. Жучков, А.В. Мещеряков, В.И. Лукьяненко, А.В. Бараков

Обсужден вопрос об использовании полимерных материалов в современном градостроительстве, потенциальных рисках нагревания и воспламенения полимеров при пожарах. Рассмотрен процесс теплообмена в полимерном материале с учетом селективного и объемного характера поглощения радиационного теплового потока во время пожара. Учтена зависимость основных теплофизических характеристик – теплоемкости, теплопроводности, плотности – от температуры. Обработкой экспериментально полученных спектров излучения полиэтилена получена аппроксимирующая аналитическая зависимость суммарного коэффициента отражения и поглощения от длины волны. Получено выражение для объемного теплового источника.

На основе экспериментальных данных по спектрам поглощения получено выражение для источникового члена в дифференциальном уравнении теплопроводности, обусловленного лучистым тепловым потоком. Обсужден вопрос о возможности численного решения уравнения теплопроводности для полимерного материала, обогреваемого лучистым тепловым потоком

Ключевые слова: пожар, теплообмен, полимерные пленки, селективный

Широкое применение полимерных материалов при отделке промышленных гражданских зданий представляет повышенную опасность при пожарах. Это обусловлено двумя обстоятельствами: во-первых – горючестью подавляющего большинства полимерных отделочных материалов; во-вторых – выделением токсичных газов из них при нагревании. Поэтому правильная оценка температурного режима полимерных материалов при пожаре представляется весьма актуальной.

Следует отметить поведение полимерных отделочных материалов при нагреве, которое является ступенчатым. При нагревании полимерные материалы могут находиться в трех разных фазовых состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Отличительными особенностями процесса нагревания полимерных материалов является их прозрачность для теплового излучения. Поэтому поглощение лучистого теплового потока происходит в объеме полимера. Кроме того, плотность, теплоемкость, теплопроводность полимерных материалов существенно зависят от температуры, а спектры излучения и поглощения носят крайне выраженный селективный характер [1,2].

Объемный характер поглощения радиационного потока тепла от нагревателя учитывается введением дополнительного слагаемого q_v в уравнение теплопроводности Фурье [3]:

$$c(t) \cdot \rho(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + q_v(x), \quad (1)$$

где $\rho(t)$, $c(t)$, $\lambda(t)$ – плотность, теплоемкость, и теплопроводность полимерного материала, соответственно; $q_v(x)$ – объемная интенсивность внутренних тепловых источников в полимере, обусловленных поглощением теплового излучения.

Величина q_v изменяется по толщине слоя полимерного материала и может быть рассчитана на основе закона Бугера [3]:

$$I_{\lambda,x} = I_{\lambda 0} \cdot e^{-\alpha_{\lambda} x}, \quad (2)$$

где I_{λ} , $I_{\lambda 0}$ – текущая интенсивность и интенсивность лучистого потока в полимерном материале у его поверхности, соответственно; α_{λ} – спектральный коэффициент поглощения теплового излучения.

Величина $I_{\lambda 0}$ равна разности интенсивностей падающего и отраженного радиационных тепловых потоков.

На рис.1 в качестве примера приведены спектры теплового излучения и поглощения полиэтиленовыми пленками. Из него следует, что поглощение в диапазоне инфракрасного излучения мало. Следовательно, значительная часть радиационного потока энергии проходит через полимерный материал и, тем самым, не приводит к его нагреванию.

Чуйков Александр Митрофанович - ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, нач. кафедры, тел. 8-920-226-73-87

Жучков Анатолий Витальевич - ВИ ГПС МЧС России, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-908-140-76-61

Мещеряков Алексей Викторович - ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-402-38-59, e-mail: Malviktp@gmail.com

Лукьяненко Владимир Ильич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-438-09-01

Бараков Александр Валентинович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-905-658-14-46

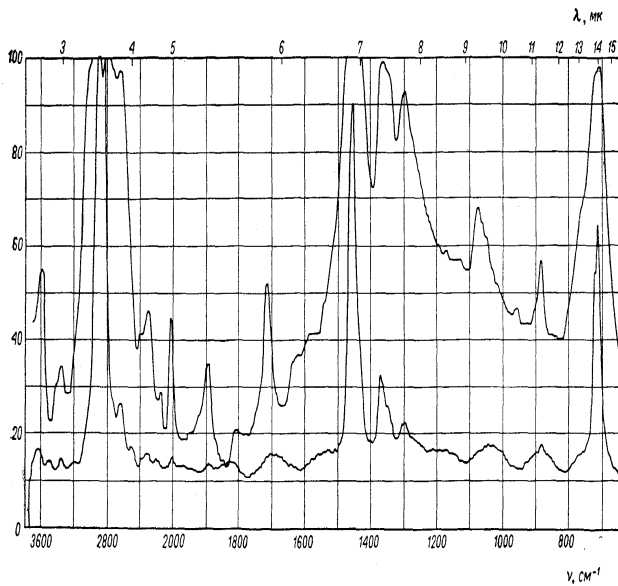


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности излучения от длины волны для полиэтилена (толщина 0,02 мм и 0,5 мм)

Для оценки поглощения радиационного теплового потока интерполируем кривую спектра поглощения (рис.1) кусочно-линейной функцией вида:

$$A_{\Sigma,k} = a_k + b_k \lambda, \quad (3)$$

где $A_{\Sigma,k}$ – суммарный коэффициент отражения и поглощения пленки.

Аппроксимирующая зависимость (3) представлена на рис. 2. По результатам аппроксимации рассчитывался спектральный коэффициент поглощения теплового излучения

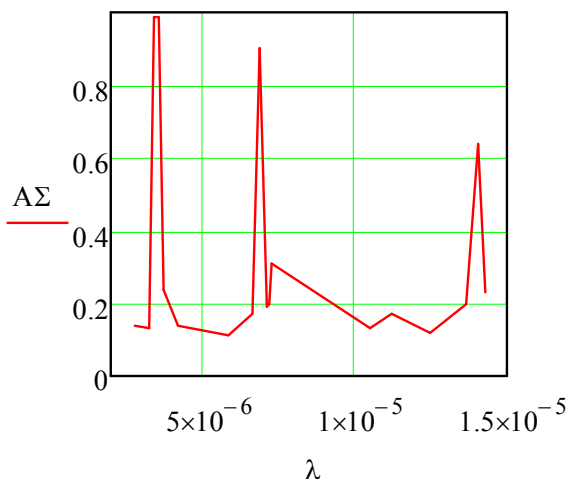


Рис. 2. Аппроксимация спектра поглощения теплового излучения кусочно-линейной функцией

$$\alpha_{\lambda,k} = \frac{1}{\delta} \ln \frac{1 - A_{\text{отр}}}{1 - A_{\Sigma,k}}, \quad (4)$$

где $A_{\lambda,\text{отр}}$ – спектральный коэффициент отражения. $A_{\lambda,\text{отр}} \approx 0.1$.

Считая излучатель серым телом, определим спектральную плотность потока излучения нагревателя из закона Планка (на поверхности излучателя) [3]:

$$E_{0\lambda} = \frac{2\pi c_1 \varepsilon}{\lambda^5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_n}} - 1 \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $c_1 = 5,944 \cdot 10^{-17}$ Вт·м², $c_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$ Вт/м³ – первая и вторая константа излучения; ε – степень черноты излучателя; T_n – температура поверхности излучателя, К.

$$I_{\lambda 0} = C_{12} (1 - A_{\text{отр}}) \cdot E_{\lambda 0}, \quad (6)$$

Здесь C_{12} – коэффициент взаимного облучения. Для идеального отражателя он равен отношению площади поверхности, излучаемой теплоту площади обогреваемой поверхности (рис. 3).

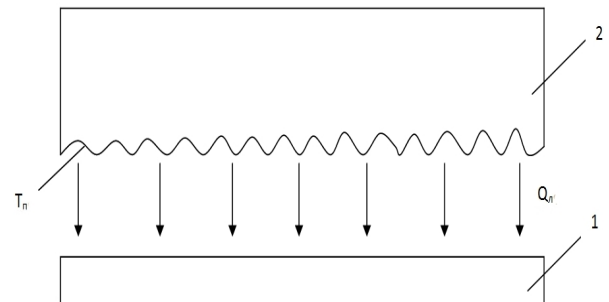


Рис. 3. Схема лучистого обогрева полимерного материала. 1 – полимерный материал, 2 – излучающая (горячая) поверхность

Интенсивность теплового потока в полимерном материале с учетом кусочно-линейной интерполяции (3, 4) можно представить в виде:

$$I_{\lambda,x} = A_0 \cdot \sum_k \frac{d\lambda}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_n}\right) - 1 \right] \cdot \exp(\alpha_{\lambda} \cdot x)}, \quad (7)$$

где $A_0 = 2\pi C_1 \varepsilon (1 - A_{\text{отр}})$.

Для интерполяции спектрального коэффициента поглощения кусочно-линейной функцией использовалось выражение:

$$\alpha_{\lambda} = \alpha_{\lambda,k} + \frac{\alpha_{\lambda,k+1} - \alpha_{\lambda,k}}{\lambda_{k+1} - \lambda_k} (\lambda - \lambda_k). \quad (8)$$

Определяем объемную интенсивность внутренних источников:

$$q_v(x) = - \int_0^{\infty} \frac{\partial I_{\lambda x}}{\partial x} d\lambda, \quad (9)$$

или с учетом (2):

$$q_v(x) = \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} I_{\lambda 0} e^{-\alpha_{\lambda} x} d\lambda, \quad (10)$$

Величина $I_{\lambda 0}$ зависит от двух факторов: коэффициента отражения полимерного материала $A_{\lambda, \text{отр}}$ и закона спектральной плотности радиационного потока излучателя.

Выражение для q_v (4) с учетом (5), (6) приобретает вид:

$$q_v(x) = 2\pi c_1 C_{12} \varepsilon \int_0^{\infty} \frac{\alpha_{\lambda} (1 - A_{\lambda, \text{отр}})}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_n}} - 1 \right)} \cdot e^{-\alpha_{\lambda} x} d\lambda, \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение (1) должно быть дополнено начальными и граничными условиями. Граничные условия записываются для верхней и нижней граней полимера (обычно третьего или первого рода). [3]

Для вычисления значения q_v по формуле (10) необходимо установить зависимость спектрального коэффициента поглощения α_{λ} от длины волны излучения λ . Эту зависимость можно получить путем обработки соответствующих кривых, представленных в литературе или на основе собственных экспериментальных данных.

Для полиэтиленовой пленки аппроксимируем кривую поглощения теплового излучения (рис. 1, $\delta=20$ мкм)

Сложный характер спектров поглощения тепловых излучений полимерными материалами исключает получение аналитических зависимостей для источников члена на основе выражения (10). Кроме того, теплофизические параметры, входящие в уравнение (1), существенно зависят от температуры, что предопределяет нелинейный характер этого уравнения. [4,5]

Таким образом, решение задачи о нагревании полимерных материалов возможно лишь на компьютере с использованием численных методов.

Заключение

1. Спектры излучения и поглощения полимерных материалов, применяемых для отделки зданий, являются селективными.

2. Поглощение теплового излучения полимерными материалами носит объемный характер. Для учета этого явления необходимо вводить источниковый член в уравнение теплопроводности.

3. Уравнение теплопроводности для полимерного материала является нелинейным. Это обусловлено сложной зависимостью источникового члена от температуры и координат, а также сильной зависимостью теплофизических параметров полимеров от температуры. Определение температурных полей в полимере возможно лишь на основе численных решений соответствующих задач.

Литература

1. Купцов А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров [Текст]: справочник / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.: Физматлит, 2001. – 581 с.
2. Теплофизические и реологические характеристики полимеров. Справочник [Текст] / под ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наукова думка, 1977. – 244с.
3. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергоатомиздат, 1981. – 342 с.
4. Методы и средства неразрушающего теплового контроля структурных превращений в полимерных материалах [Текст]: монография / Н.Ф. Майникова, С.В. Мищенко, Н.П. Жуков, И.В. Рогов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 320 с.
5. Чистякова, Т.Б. Математическое моделирование химико-технологических объектов с распределенными параметрами [Текст] / Т.Б. Чистякова, А.Н. Полосин, Л.В. Гольцева. - СПб.: Профессия, 2010. - 240 с.

Воронежский институт ГПС МЧС России

Воронежский государственный технический университет

EVALUATION OF TEMPERATURE POLYMERFINISHING MATERIALS DURING FIRE

A.M. Chuikov, Candidate of Technical Sciences, Head of the department of chemistry and combustion processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: hipg_vigps@mail.ru

A.V. Zhuchkov, Doctor of Technical Science, professor Department of chemistry and combustion processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: 79081407661@yandex.ru

A.V. Meshcheryakov, Candidate of Technical Sciences, assistant professor Department of chemistry and combustion processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Malviktp@gmail.com

V.I. Lukyanenko, Candidate of Technical Sciences, assistant professor Department of Theoretical and industrial power system, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lukyanenko1@yandex.ru

A.V. Barakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical and industrial power system, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Discussed the use of polymeric materials in a modern town planning, the potential risks of heating and ignition of polymers in fires. Considered in the heat transfer process polymeric material based on the volume and nature of selective absorption of radiation heat flow during the fire. Noted dependence of the basic thermal characteristics - specific heat, thermal conductivity, density - temperature. Treatment of experimentally obtained polyethylene emission spectra obtained by approximating analytical dependence of the total reflectance and absorption of the wavelength. An expression for the volume of the heat source.

On the basis of experimental data for the absorption spectra obtained an expression for the source term in the differential equation of heat conduction due to the radiant heat flow. We discussed the possibility of a numerical solution of the heat equation for polymer material, heated by radiant heat flow

Key words: fire, heat, polymer films, selective

References

1. Kupzov A.X. Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov [FT-Raman and FT-IR spectra of polymers] / AH Merchants, GN Zhizhin. - M.: FIZMATLIT, 2001. - vol.581.
- 2/ Teplofizicheskie i reologicheskie harakteristiki polimerov [Thermal and rheological properties of polymers] / Ed. Y.S. Lipatov. - Kiev: Naukova Dumka, 1977. - vol.244.
3. Isachenko, V.P. Teploperedacha [Heat] / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. - M.: Energoatomizdat, 1981. - vol.342.
4. Metody i sredstva nerazrushajushhego teplovogo kontrolja strukturnyh prevrashhenij v polimernyh materialah [Methods and tools for non-destructive thermal control of structural transformations in polymeric materials]: Monograph / N.F. Maynikova, S.V. Mishchenko, N.P. Zhukov, I.V. Rogov. - Tambov: Publishing House of VPO "TSTU", 2012. - vol.320.
5. Chistyakova T.B., Polosin A.N., Goltseva L.V. Matematicheskoe modelirovanie himiko-tehnologicheskikh objektov s raspredelennymi parametrami [Mathematical modeling of chemical-technological objects with distributed parameters]. - SPb.: Profession, 2010. - vol.240.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБНОГО ПУЧКА НА ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С УЧЁТОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ

С.В. Дахин, И.Г. Дроздов, В.И. Ряжских

Рассматривается влияние геометрических характеристик оребренной поверхности теплообменных трубок в малорядных трубных пучках на основные характеристики воздухоохлаждаемых теплообменников. Для этой цели предлагается математическая модель, где проводится дробление поверхности теплообмена по ходу греющего теплоносителя на n равных по длине элементов, которые по ходу воздуха ограничены половиной расстояния между соседними поперечными рядами трубок. Таким образом, выделяются $n \times m$ расчётных объёмов, в каждом реализуется модель "идеальное вытеснение - идеальное перемешивание", которая в рамках модели с сосредоточенными параметрами сводится к задаче распределения по расчётным объёмам элементарных тепловых потоков. Предлагаемый подход позволяет непосредственно определить температурный напор между теплоносителями без привлечения дополнительных функций, точно определить которые для сложных схем течения достаточно проблематично, моделировать работу теплообменника с результатом, аналогичным результату численного интегрирования дифференциальных уравнений теплопередачи и теплового баланса, но без привлечения специальных средств или пакетов программирования, что ускоряет и удешевляет процесс, и моделировать различные схемы течения теплоносителей при минимуме итерационных процедур.

Результаты моделирования показали, что наиболее существенное влияние на тепловую мощность аппарата оказывают высота ребра, материал поверхности теплообмена и наружный диаметр теплообменной трубки, а шаг и толщина ребра, поперечный и диагональный шаги трубного пучка имеют меньшее влияние.

Для моделирования работы теплообменника на нестационарных режимах получено аналитическое выражение, позволяющее оценить время выхода на стационарный режим в зависимости от условий теплообмена, геометрических характеристик и материала теплообменной поверхности. Безразмерный вид полученного выражения является универсальным, т.е. позволяет получать решения для любых типов поверхностных теплообменных устройств без каких-либо ограничений.

Показана возможность интенсификации теплоотдачи со стороны ребра, которая приводит к уменьшению массы аппарата до 40 %, что приводит к уменьшению габаритов аппарата и времени выхода на стационарный режим работы. При этом из-за малорядности трубного пучка рост гидродинамического сопротивления не приводит к заметному увеличению потребляемой мощности на прокачку теплоносителя

Ключевые слова: рёбра, нестационарный режим, лунки, интенсификация

Воздухоохлаждаемые теплообменные аппараты используются практически во всех отраслях народного хозяйства: промышленности, энергетике, предприятиях перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию и т.д., а так же при охлаждении компонентов радиоэлектронных устройств.

Относительно низкий коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха компенсируется оребрением поверхности теплообмена, величина которого выбирается из условия равенства внешних термосопротивлений при теплопередаче.

По конструкции поверхности теплообмена, воздухоохлаждаемые теплообменники являются трубчатыми аппаратами, не имеющими в традиционном понятии корпуса - трубный пучок не имеет герметизации межтрубного пространства, устанавливаются лишь боковые стенки, равные длине труб.

В зависимости от назначения и условий применения такие теплообменники различаются по размерам - от нескольких сантиметров (охлаждение электронных компонентов), до сотен метров (градирни с естественной тягой), а так же по дизайну.

Несмотря на всё многообразие видов и форм воздушных теплообменников можно выделить обя-

зательные для всех конструктивные элементы - оребрение поверхности со стороны воздуха и крайне небольшая толщина аппаратов, т.е. по ходу потока воздуха эти теплообменники имеют 1 - 8 рядов трубок. Последнее связано с малой теплоёмкостью воздуха и увеличение количества рядов больше некоторого предельного числа не приведёт к повышению тепловой производительности аппарата.

Существенная зависимость коэффициента теплоотдачи оребренной поверхности трубных пучков от множества факторов (форма и геометрия ребра, расстояние между рёбрами, характеристики самого трубного пучка, возможность интенсификации теплоотдачи на ребре), не позволяет однозначно выделить наиболее значимые для повышения эффективности аппарата. Задача ещё более усложняется для теплообменников, работающих при нестационарных нагрузках.

Для сравнительной оценки влияния различных факторов на тепловую производительность воздухоохлаждаемых теплообменников воспользуемся моделью типа "идеальное вытеснение - идеальное перемешивание" (рис. 1). Здесь для потока жидкого теплоносителя (индекс 1) рассматривается модель "идеального вытеснения", а для воздуха (индекс 2) модель "идеального перемешивания"; G_1, L_2 - массовый расход греющего теплоносителя и воздуха соответственно, k_2/c ; d, D - диаметр теплообменной трубки и круглого поперечного ребра, m .

Дахин Сергей Викторович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: svdakhin@ya.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: drozdov_ig@mail.ru

Ряжских Виктор Иванович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

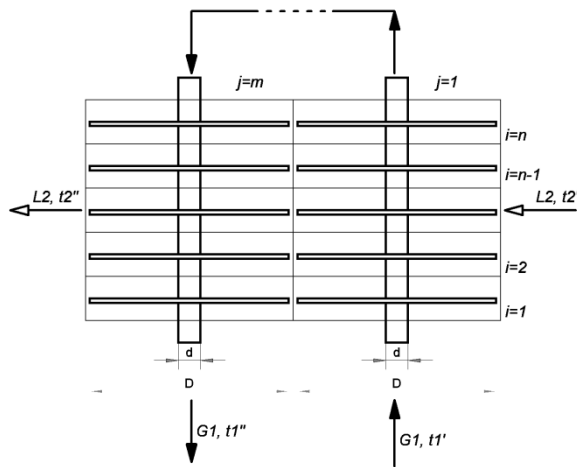


Рис. 1. Принципиальная схема модели

Математическую модель такого теплообменника можно записать в виде [1]:

$$f_1 C_{v1} \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = -V_1 C_{v1} \frac{\partial t_1}{\partial l} - \frac{F}{L} k \Delta t, \quad (1)$$

$$V C_{v2} \frac{\partial t_2}{\partial \tau} = V_2 C_{v2} (t_2'' - t_2') + k F \Delta t. \quad (2)$$

Здесь f_1 - площадь поперечного сечения зоны вытеснения, m^2 ; C_{v1} , C_{v2} - изохорные теплоёмкости единицы объёма греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно, $Дж/(м^3 K)$; t_1 , t_2 - температура греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно, верхний индекс "штрих" означает вход в зону идеального перемешивания, "два штриха" - выход, $^{\circ}C$; τ - время, с; V_1 , V_2 - объёмный расход греющего и нагреваемого теплоносителей соответственно, $м^3/с$; V - объём зоны идеального перемешивания, $м^3$; F - площадь поверхности теплообмена, $м^2$; L - длина зоны идеального вытеснения, $м$; l - длина теплообменной поверхности, $м$; k - коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 K)$; $\Delta t = t_1 - t_2$ - температурный напор, K .

Так как конструкция теплообменника не предполагает реверс обоих теплоносителей (для воздуха это энергетически не оправдано), то остановимся на реализации интервально-итерационного расчёта, который в рамках модели с сосредоточенными параметрами сводится к задаче распределения по расчётным объёмам элементарных тепловых потоков Q_{ji} . Методика предполагает дробление поверхности теплообмена по ходу греющего теплоносителя на n равных по длине элементов, которые по ходу воздуха ограничены половиной расстояния между соседними поперечными рядами трубок. Таким образом выделяются $n \times m$ расчётных объёмов, в каждом из которых реализуется модель "идеальное вытеснение - идеальное перемешивание" и теплофизические свойства теплоносителей можно с достаточной достоверностью считать постоянными.

Исходными данными принимаются: температура теплоносителей t_1' , t_1'' , t_2' , t_2'' , $^{\circ}C$; массовый расход греющего теплоносителя G_1 , $кг/с$; тепловая мощность Q , $Вт$ (t_1'' может быть не задана и однозначно определена по уравнению теплового баланса); теплофизические свойства теплоносителей, причём их зависимость от температуры известна; размеры элементов теплообменной поверхности.

Полагая, что в пределах выделенного элемента температура и теплофизические свойства теплоносителей постоянны, постоянными и равными средним значениям будут коэффициенты теплоотдачи $\overline{a_{ji}} = const$, $\overline{a_{ji}} = const$, следовательно и $k_{ji} = const$.

Коэффициенты теплоотдачи определяются для конкретной геометрии поверхности теплообмена, например по [2].

Тепловой поток выделенного элемента определяется по уравнению теплопередачи

$$Q_{ji} = k_{ji} F_{1ji} \Delta t_{ji}, \quad Вт, \quad (3)$$

где $\Delta t_{ji} = (t_{1ji} - t_{2ji})$, K .

Тепловая мощность теплообменника определяется как

$$Q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Q_{ji}. \quad (4)$$

Моделирование гидродинамических процессов проводилось для аппарата в целом без разделения на расчётные элементы при допущении, что сопротивление последовательно включённых элементов равно сумме их отдельных сопротивлений и сводится к определению мощности на валу насоса или вентилятора, необходимого для перемещения теплоносителя через аппарат.

Для моделирования теплогидравлических процессов принимаем конструкцию блока воздушного охлаждения гибридной системы локальной термостабилизации электронных модулей на основе микроканальных теплообменников и термоэлектрических преобразователей [3].

Интервально-итерационные расчёты математических моделей теплообменных аппаратов аналогичны численному интегрированию дифференциальных уравнений теплопередачи и теплового баланса с изменяющимися в ходе каждой итерации граничными условиями, и позволяют проанализировать влияние изменения какого-либо параметра. Модель позволяет непосредственно определить температурный напор между теплоносителями без привлечения дополнительных функций, точно определить которые для сложных схем течения достаточно проблематично.

Выбираем геометрию воздухоохлаждаемого теплообменного аппарата как пять последовательно соединённых по воде оребрённых трубок по $l_1 = 0,2 м$ каждая. Оребрение выполнено в виде круглых рёбер постоянной толщины. По ходу воздуха трубки составляют один поперечный ряд, исключение для варианта при анализе влияния диаго-

нального шага пучка S_2' , где трубки расположены в шахматном порядке. Материал теплообменника - медь с коэффициентом теплопроводности $\lambda_m = 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Для оценки влияния геометрических факторов, свойств материала и температуры воздуха на тепловую мощность и потери давления теплообменного аппарата, принимаем за базовый вариант следующие результаты моделирования: тепловая мощность $Q^{\text{баз}} = 565 \text{ Вт}$; температура воды на выходе $t_1'' = 54,3^\circ\text{C}$; диаметр теплообменной трубки $d_2^{\text{баз}}/d_1^{\text{баз}} = 5/3,4 \text{ мм}$; диаметр ребра $D^{\text{баз}} = 40 \text{ мм}$; толщина ребра $\delta^{\text{баз}} = 0,5 \text{ мм}$; шаг ребер $h^{\text{баз}} = 1 \text{ мм}$; поперечный (по ходу воздуха) шаг трубного пучка $S_1^{\text{баз}} = 40 \text{ мм}$; скорость воды $w_1 = 1,98 \text{ м/с}$; скорость воздуха $w_2 = 5 \text{ м/с}$; потери давления по воде и воздуху $\Delta p_1^{\text{баз}} = 1550 \text{ Па}$, $\Delta p_2^{\text{баз}} = 4,95 \text{ Па}$.

Оценка точности проводилась численным сравнением значения тепловой мощности при изменении числа расчётных ячеек. Сравнивались результаты при $n = 5, 25, 50, 100, 250, 500, 1000$ ячеек (рис. 2), видно, что увеличение числа расчётных ячеек более 100 не приводит к существенному изменению результата.

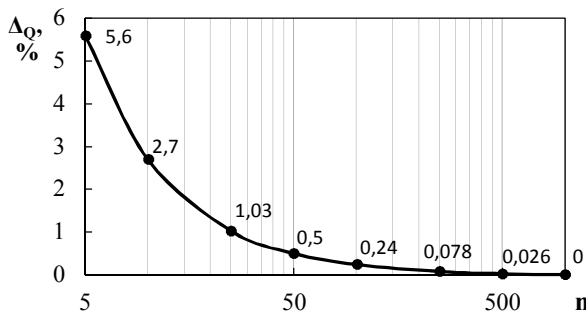


Рис. 2. Относительная погрешность моделирования

Варьируем следующими величинами в указанном диапазоне: $D = 25 \div 55 \text{ мм}$; $S_1 = 40 \div 60 \text{ мм}$; $S_2' = 44 \div 66 \text{ мм}$; $h = 0,5 \div 1,0 \text{ мм}$; $\delta = 0,25 \div 1,0 \text{ мм}$; $d_2 = 5 \div 10 \text{ мм}$; $\lambda = 15 \div 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $t_2' = 0 \div 60^\circ\text{C}$.

Для корректности сравнения изменяем только один параметр - остальные характеристики аппарата остаются без изменений.

Результаты сравнения удобно представить графически в безразмерном виде, причём не сами функции, а линии их тренда (рис. 3). По оси ординат отложим безразмерную тепловую мощность $Y = Q_x / Q_x^{\text{баз}}$, по оси абсцисс изменяемые величины в безразмерном виде $X = f_x / f_x^{\text{баз}}$, где

$$Q_x = \begin{cases} f_1(D); \\ f_2(S_1); \\ f_3(S_2'); \\ f_4(h); \\ f_5(\delta); \\ f_6(\lambda); \\ f_7(t_2'); \\ f_8(d_2); \end{cases} \quad Q_x^{\text{баз}} = \begin{cases} f_1(D^{\text{баз}}); \\ f_2(S_1^{\text{баз}}); \\ f_3(S_2'^{\text{баз}}); \\ f_4(h^{\text{баз}}); \\ f_5(\delta^{\text{баз}}); \\ f_6(\lambda^{\text{баз}}); \\ f_7(t_2'^{\text{баз}}); \\ f_8(d_2^{\text{баз}}). \end{cases} \quad (5)$$

Нумерация линий соответствует номеру в (5).

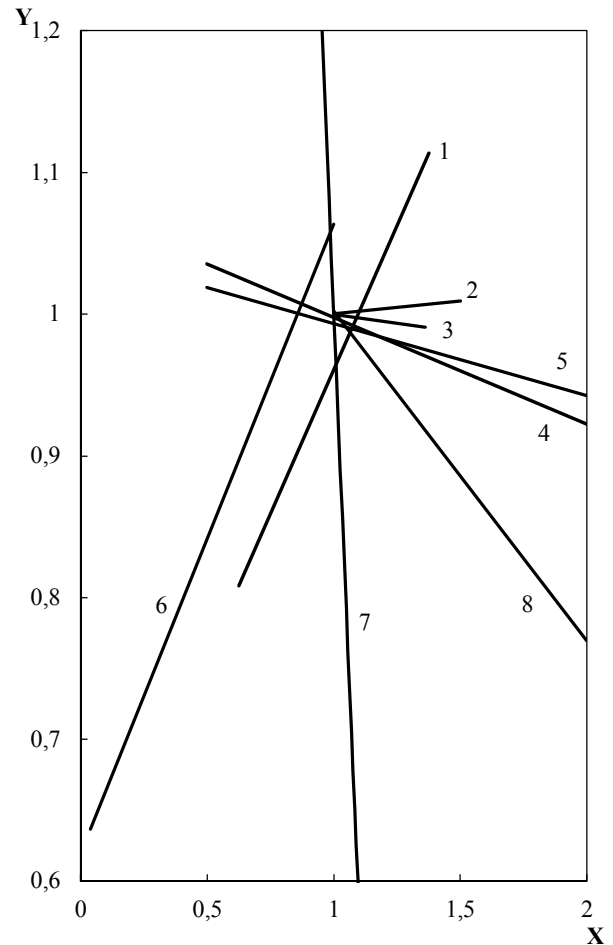


Рис. 3. Линии тренда зависимости тепловой мощности от различных факторов

Некоторое расхождение линий в точке (1;1) связано с тем, что нелинейные функции заменены линейной аппроксимацией, но в нашем случае такая замена допустима.

Анализ рис. 3 позволяет, по величине углового коэффициента линии тренда, выделить четыре группы по степени влияния на тепловую производительность аппарата: максимальное; существенное; достаточное и незначительное.

Максимальное влияние оказывает, очевидно, температура воздуха на входе (линия 7).

Существенное влияние оказывают диаметр (высота) ребра (линия 1), материал поверхности

теплообмена (линия 6) и наружный диаметр теплообменной трубки (линия 8).

Достаточное влияние оказывают шаг (линия 4) и толщина ребра (линия 5).

Незначительное влияние оказывают поперечный (линия 2) и диагональный (линия 3) шаги трубного пучка.

Изменение Δp_1 интереса не представляет, а для Δp_2 применим алгоритм как для Q , при этом $Y = p_x / p_x^{\text{баз}}$. Результаты представлены на рис. 4, обозначения соответствуют рис. 3.

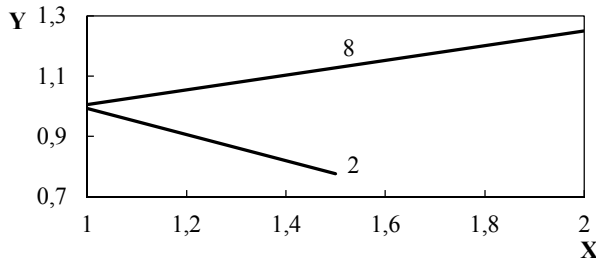


Рис. 4. Линии тренда зависимости перепада давления по воздуху от различных факторов

Здесь можно выделить две группы факторов, влияющих на перепад давления по воздуху: существенное и незначительное.

Существенное влияние оказывают поперечный шаг трубного пучка (линия 2) и наружный диаметр теплообменной трубки (линия 8).

Незначительное влияние оказывают диаметр (высота) ребра (линия 1), диагональный (линия 3) шаг трубного пучка, шаг (линия 4) и толщина ребра (линия 5), материал поверхности теплообмена (линия 6) и температура воздуха на входе (линия 7). Эти линии на рисунке не показаны.

Одним из способов повышения эффективности воздушного охлаждения, следовательно, повышения компактности, является применение рельефных рёбер, например со сферическими лунками. Предполагается, что это одновременно решает две задачи: за счёт увеличения площади поверхности снижается термическое сопротивление теплоотдачи (так называемое «оребрённое ребро»), а за счёт образования вихревого течения интенсифицируется сам процесс теплоотдачи, уменьшая потребную площадь теплообмена [4], [5].

Так как совокупность рёбер на трубках можно рассматривать как совокупность плоских каналов для воздуха, то влияние определяющих режимных параметров потока и конструктивных параметров интенсификаторов на среднюю теплоотдачу в каналах можно проследить на примере зависимости [6]:

$$\frac{\overline{Nu}}{Nu_0} = 1,0 + 6,183 \left(\frac{h_a}{d_a} \right)^{1,162}, \quad (6)$$

где Nu_0 - критерий Нуссельта для гладкой поверхности канала; h_a и d_a - глубина и диаметр лунки соответственно.

Если принять, что $h/d_a = 1$ и $h_a/d_a = 0,25$, а так как $h = 1 \text{ мм}$, то $d_a = 1 \text{ мм}$ и $h_a = 0,25 \text{ мм}$. В этом случае коэффициент теплоотдачи со стороны ребра увеличится в 2,24 раза, что приведёт, по результатам моделирования, к уменьшению поверхности теплообмена на 11 %, а массы аппарата до 42 %. При этом, из-за малорядности трубного пучка в теплообменнике, рост гидродинамического сопротивления не приведёт к заметному увеличению потребной мощности на прокачку теплоносителя.

Нестационарные режимы при работе воздухоохлаждаемого теплообменника могут иметь место в начальный период времени при включении аппарата, а также при резком изменении входных параметров - температуры и скорости теплоносителей. Моделирование нестационарной работы проводится после моделирования в стационарном режиме и определения конструктивных параметров.

Исходная математическая модель имеет вид:

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} = \alpha_1 F_1 \left[\frac{t_1^0 + t_1^\infty(\tau)}{2} - t_w(\tau) \right]; \quad (7)$$

$$\frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = \alpha_2 F_2 \left[t_w(\tau) - \frac{t_2^0 + t_2^\infty(\tau)}{2} \right]; \quad (8)$$

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} = G_1 c_{p1} [t_1^0 - t_1^\infty(\tau)]; \quad (9)$$

$$\frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = G_2 c_{p2} [t_2^\infty(\tau) - t_2^0]; \quad (10)$$

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} - \frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = M_w c_{pw} \frac{dt_w(\tau)}{d\tau}; \quad (11)$$

$$t_1^\infty(0) = t_1^0; \quad (12)$$

$$t_2^\infty(0) = t_2^0; \quad (13)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, F_1, F_2, G_1, G_2, c_{p1}, c_{p2}$ - коэффициенты теплоотдачи, площадь поверхности теплообмена, массовые расходы, удельные изобарные теплоёмкости для соответствующего теплоносителя; M_w, c_{pw} - масса и удельная изобарная теплоёмкость теплопередающей поверхности; $t_1^0, t_2^0, t_1^\infty(\tau), t_2^\infty(\tau)$ - начальная и текущая температура соответствующих теплоносителей; $t_w(\tau)$ - текущая средняя температура стенки теплопередающей поверхности; τ - время.

Начальная температура стенки в модели (7) - (13) не может быть определена заранее, а только из окончательного решения с выполнением общего теплового баланса.

$$\text{Обозначив: } \theta = \frac{F_1 \lambda_1 \tau}{M_w c_{pw} d_1}; \quad T_{1,2}(\theta) = \frac{t_{1,2}^\infty(\tau) - t_2^0}{t_1^0 - t_2^0};$$

$$T_w^\infty(\theta) = \frac{t_w(\tau) - t_2}{t_1^0 - t_2^0}; \quad A = \frac{F_2 \lambda_2 d_1}{F_1 \lambda_1 d_2}; \quad \xi_{1,2} = \frac{k_F^{(1,2)} d_{1,2}}{2\pi l};$$

$$Nu_{1,2} = \frac{\alpha_{1,2} d_{1,2}}{\lambda_{1,2}}; \quad Re_{1,2} = \frac{w_{1,2} d_{1,2}}{\nu_{1,2}}, \text{ запишем уравнения}$$

модели в безразмерном виде:

$$\frac{dq_1(\theta)}{d\theta} = Nu_1 \left[\frac{1}{2} T_1^\infty(\theta) - T_w(\theta) + \frac{1}{2} \right]; \quad (14)$$

$$\frac{dq_2(\theta)}{d\theta} = ANu_2 \left[T_w(\theta) - \frac{1}{2} T_2^\infty(\theta) \right]; \quad (15)$$

$$\frac{dq_1(\theta)}{d\theta} = \xi_1 Re_1 Pr_1 [1 - T_1^\infty(\theta)]; \quad (16)$$

$$\frac{dq_2(\theta)}{d\theta} = A\xi_2 Re_2 Pr_2 T_2^\infty(\theta); \quad (17)$$

$$\frac{dq_1(\theta)}{d\theta} - \frac{dq_2(\theta)}{d\theta} = \frac{dT_w(\theta)}{d\theta}; \quad (18)$$

$$T_1^\infty(0) = 1; \quad (19)$$

$$T_2^\infty(0) = 0, \quad (20)$$

где $Pr_{1,2}$, $\lambda_{1,2}$, $\nu_{1,2}$ - критерий Прандтля и коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости соответствующего теплоносителя; $d_{1,2}$ - гидравлические диаметры со стороны теплоносителей; $k_F^{(1,2)}$ - коэффициент формы проходного сечения со стороны теплоносителей; $w_{1,2}$ - скорость теплоносителей; l - характерный размер теплопередающей поверхности.

Система (14) - (20) преобразуется в систему дифференциально-алгебраических уравнений относительно $T_{1,2}^\infty(\theta)$ и $T_w(\theta)$:

$$\frac{dT_w(\theta)}{d\theta} = Nu_1 \left[\frac{1}{2} T_1^\infty(\theta) - T_w(\theta) + \frac{1}{2} \right] - ANu_2 \left[T_w(\theta) - \frac{1}{2} T_2^\infty(\theta) \right]; \quad (21)$$

$$\frac{dT_w(\theta)}{d\theta} = \xi_1 Re_1 Pr_1 [1 - T_1^\infty(\theta)] - A\xi_2 Re_2 Pr_2 T_2^\infty(\theta); \quad (22)$$

$$Nu_1 \left[\frac{1}{2} T_1^\infty(\theta) - T_w(\theta) + \frac{1}{2} \right] = \xi_1 Re_1 Pr_1 [1 - T_1^\infty(\theta)]; \quad (23)$$

$$Nu_2 \left[T_w(\theta) - \frac{1}{2} T_2^\infty(\theta) \right] = \xi_2 Re_2 Pr_2 T_2^\infty(\theta); \quad (24)$$

$$T_1^\infty(0) = 1; \quad (25)$$

$$T_2^\infty(0) = 0. \quad (26)$$

Уравнения (21) и (22) эквивалентны, поэтому выразив из (23) и (24) соответственно $T_1^\infty(\theta)$ и $T_2^\infty(\theta)$ через $T_w(\theta)$, получим:

$$T_1^\infty(\theta) = \frac{2Nu_1 T_w(\theta) - Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1}; \quad (27)$$

$$T_2^\infty(\theta) = \frac{2Nu_2 T_w(\theta)}{Nu_2 + 2\xi_2 Re_2 Pr_2}. \quad (28)$$

Подставляя (27) и (28), например, в (22), запишем

$$\begin{aligned} & \frac{dT_w(\theta)}{d\theta} + \left(\frac{2\xi_1 Nu_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} + \frac{2A\xi_2 Nu_2 Re_2 Pr_2}{Nu_2 + 2\xi_2 Re_2 Pr_2} \right) T_w(\theta) = \\ & = \xi_1 Re_1 Pr_1 \left(1 + \frac{Nu_1 - 2\xi_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} \right). \end{aligned} \quad (29)$$

Вводя обозначения:

$$\Omega = \frac{2\xi_1 Nu_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} + \frac{2A\xi_2 Nu_2 Re_2 Pr_2}{Nu_2 + 2\xi_2 Re_2 Pr_2}; \quad (30)$$

$$\Psi = \xi_1 Re_1 Pr_1 \left(1 + \frac{Nu_1 - 2\xi_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} \right), \quad (31)$$

уравнение (29) примет вид:

$$\frac{dT_w(\theta)}{d\theta} + \Omega T_w(\theta) = \Psi, \quad (32)$$

решение которого в формулировке задачи Коши таково:

$$T_w(\theta) = T_w(0) \exp(-\Omega\theta) + \frac{\Psi}{\Omega} [1 - \exp(-\Omega\theta)]. \quad (33)$$

Из (25) и (27) следует, что

$$T_w(0) = 1. \quad (34)$$

Моделирование работы теплообменного аппарата на нестационарных режимах проводилось для различных материалов - медь, алюминиевый сплав, высоколегированная сталь при $Q = const$, а также для варианта при интенсификации теплоотдачи со стороны ребра при различной температуре воздуха. Результаты моделирования для $t_2 = 50^\circ\text{C}$ представлены на рис. 5, где 1 - алюминиевый сплав; 2 - то же, при интенсификации теплоотдачи; 3 - высоколегированная сталь.

Медь и алюминиевый сплав показали практически идентичные результаты. Это связано с тем, что потребная масса меди почти в три раза больше необходимой массы алюминиевого сплава, а теплоёмкость меди, в свою очередь, практически в три раза меньше теплоёмкости алюминиевого сплава.

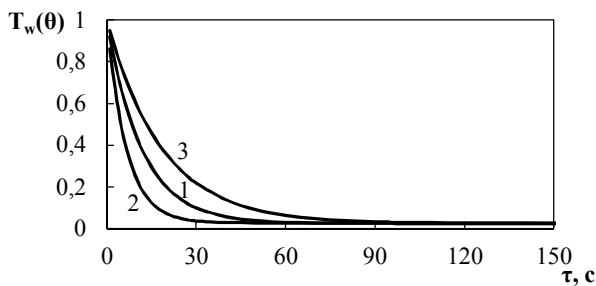


Рис. 5. Время выхода теплообменного аппарата на стационарный режим

Для стального теплообменника необходимо увеличить площадь теплообмена, что приведёт к увеличению массы аппарата до 5,7 кг.

Время необходимое для изменения температуры стенки не хуже чем на 0,1 % составит для алюминиевого сплава - $\tau_{0,1}^{Al} = 50c$, для высоколегированной стали - $\tau_{0,1}^{Fe} = 70c$. Полная стабилизация температуры стенки наступит для алюминия через $\tau^{Al} = 140c$, для стали через $\tau^{Fe} = 180c$.

Для интенсифицированного варианта теплообменного аппарата из-за уменьшения массы время выхода на стационарный режим сократилось и составило $\tau_{0,1} = 30c$ и $\tau = 80c$.

Изменение температуры воздуха на входе в аппарат хотя и даёт снижение температуры воды на выходе в соответствии с увеличением тепловой производительности, однако время стабилизации температуры стенки увеличивается и составляет:

при $t_2' = 30^\circ C$ - $\tau_{0,1} = 50c, \tau = 90c$;

при $t_2' = 0^\circ C$ - $\tau_{0,1} = 60c, \tau = 90c$.

Но так как характер зависимости не меняется, чтобы не загромождать рисунок, линии не показаны.

Увеличение времени установления теплового равновесия при уменьшении температуры воздуха происходит из-за увеличения температурного напора между теплоносителями, что, следовательно, приводит к повышенному количеству теплоты передаваемой через поверхность теплообмена.

Применение уравнения (33) в рамках интервально-итерационного расчёта к отдельной ячейке, позволяет определить время выхода отдельных частей поверхности теплообмена на стационарный режим:

$$t_w = \varphi(l_F, \tau), \quad (35)$$

где l_F - линейная геометрическая характеристика или "длина" поверхности теплообмена.

Таким образом, предлагаемый в статье подход позволяет моделировать работу теплообменника с результатом, аналогичным результату численного

интегрирования дифференциальных уравнений теплопередачи и теплового баланса, но без привлечения специальных средств или пакетов программирования, что ускоряет и удешевляет процесс моделирования различных схем течения теплоносителей при минимуме итерационных процедур.

Полученное аналитическое выражение для моделирования работы теплообменника на нестационарных режимах является универсальным и позволяет получать решения для любых типов поверхностных теплообменных устройств без каких-либо ограничений.

Показана возможность интенсификации теплоотдачи со стороны ребра, которая приводит к уменьшению массы, габаритов и времени выхода аппарата на стационарный режим работы.

Результаты моделирования позволяют выделить геометрические характеристики оребрённого трубного пучка, имеющие наибольшее влияние на исследуемый параметр, которые, вместе с учётом времени выхода на стационарный режим, можно использовать при оптимизации работы теплообменного аппарата в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы (Соглашение №14.577.21.0202, уникальный идентификатор RFMEFI57715X0202).

Литература

1. Бондарь, А.Г. Математическое моделирование в химической технологии [Текст] / А.Г. Бондарь. - Вища школа. - 1973. - 280 с.
2. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам [Текст] / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.И. Селиверстов. - М.: Машиностроение. - 1989. - 367 с.
3. Разработка моделей основных процессов в элементах гибридной системы локальной термостабилизации. Математическое моделирование [Текст] // Отчет о ПНИЭР за 2 этап (№ гос. регистрации АААА-А15-115121050105-0).
4. Дахин, С. В. Влияние рельефа поверхности тонкого прямого ребра на изменение его температуры [Текст] / С. В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7. - № 3. - С. 68-70.
5. Дахин, С. В. Экспериментальное исследование температурного поля плоской профилированной пластины [Текст] / С. В. Дахин, Н. А. Палихов. // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 7-1. - С. 98-101.
6. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования: монография [Текст] / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимов, А.В. Щелчков, С.И. Каськов. - Казань: Центр инновационных технологий, 2009. - 531 с.

INFLUENCE OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF THE PIPE BUNCH ON KEY PARAMETERS OF AIR-COOLED HEAT EXCHANGERS TAKING INTO ACCOUNT THE NON-STATIONARY MODES OF THEIR WORK

S.V. Dakhin, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: svdakhin@ya.ru

I.G. Drozdov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: drozdov_ig@mail.ru

V.I. Ryazhskikh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

Influence of geometrical characteristics of an finned surface of heatexchange tubes in low-line pipe bunches on the main characteristics of air-cooled heat exchangers is considered. For this purpose the mathematical model where crushing of a surface of heat exchange on the course of the heating heat carrier is carried out on is offered n elements, equal on length, which on the course of air are limited to a half of distance between the next cross ranks of tubes. Thus are allocated $n \times m$ settlement volumes, in everyone the "ideal replacement-ideal hashing" model which, within model with the concentrated parameters is realized, reduced to a problem of distribution of settlement volumes of elementary thermal streams. The offered approach allows to define directly a temperature pressure between heat carriers without attraction of additional functions, to define precisely which for difficult schemes of a current is rather problematic, to model operation of the heat exchanger with the result similar to result of numerical integration of the differential equations of a heat transfer and thermal balance, but without attraction of special means or packages of programming that accelerates and reduces the price of process and to model various schemes of a current of heat carriers at a minimum of iterative procedures.

Results of modeling showed that the most significant effect on the thermal power of the device is had edge height, material of a surface of heat exchange and outer diameter of a heatexchange tube, and the step and thickness of an edge, cross and diagonal steps of a pipe bunch have smaller influence.

For modeling of operation of the heat exchanger on the non-stationary modes the analytical expression allowing to estimate time of an exit to the stationary mode depending on conditions of heat exchange, geometrical characteristics and material of a heatexchange surface is received. The dimensionless type of the taught expression is universal, i.e. allows to receive decisions for any types of heatexchange devices without any restrictions.

The possibility of an intensification of a thermolysis from an edge which leads up to 40% to reduction of mass of the device that leads to reduction of dimensions of the device and time of an exit to a stationary operating mode is shown. At the same time, because of a low-lane of a pipe bunch, growth of hydrodynamic resistance does not lead to noticeable increase in required power at pumping of the heat carrier

Key words: edges, non-stationary mode, holes, intensification

References

1. Bondar', A.G. Matematicheskoe modelirovanie v himicheskoy tehnologii [Mathematical modeling in chemical technology] // A.G. Bondar'. - Vishha shkola. - 1973. - 280 s.
2. Bazhan, P.I. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Reference book on heat exchangers] / P.I. Bazhan, G.E. Kanevec, V.I. Seliverstov. – M.: Mashinostroyeniye. - 1989. – 367 s.
3. Razrabotka osnovnykh modeley processov v jelementah gibridnoj sistemy lokal'noj termostabilizacii. Matematicheskoe modelirovanie [Development of models of the main processes in elements of hybrid system of local thermostabilization. Mathematical modeling] // Otchet o PNIJeR za 2 jetap (№ gos. registracii AAAA-A15-115121050105-0).
4. Dakhin, S. V. Vliyanie rel'efa poverhnosti tonkogo prjamogo rebra na izmenenie ego temperatury [Influence of a relief of a surface of a thin direct edge on change of its temperature] / S. V. Dahin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2011. - T. 7. - № 3. - S. 68-70.
5. Dakhin, S. V. Jeksperimental'noe issledovanie temperaturnogo polja ploskoj profilirovannoj plastiny [Experimental study of temperature field of flat profiled plate] / S. V. Dahin, N. A. Palihov. // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. - 2012. - T. 8. - № 7-1. - S. 98-101.
6. Gortyshev, Ju.F. Teplogidravlicheskaja jeffektivnost' perspektivnykh sposobov intensifikacii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya: monografija [Thermal hydraulic efficiency perspective ways of intensification of heat transfer in the channels of heat exchange equipment: monograph] / Ju.F. Gortyshev, I.A. Popov, V.V. Olimiev, A.V. Shhelchikov, S.I. Kas'kov. - Kazan': Centr innovacionnykh tekhnologij, 2009. - 531 s.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ БЛОКА С РАЗВЕТВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В.М. Зароченцев, Т.В. Кондратенко, А.К. Макоева

Целью представленной статьи является разработка математической модели, позволяющей исследовать динамические процессы нагрева и охлаждения массивного блока при свободном распределении тепловых потоков.

Предложенная ранее физическая модель состоит из массивного блока, нагревательного элемента и вентилятора, она позволяет определять тепловые потоки в стационарных условиях. Решение задачи определения показателей тепловых потоков в таких условиях требует разработки обобщенной модели на основании экспериментальных данных. При этом модель должна быть достаточно гибкой, чтобы была возможность адаптировать ее под различные условия работы установки. Основой для построения такой модели является система математических уравнений, описывающих потоки тепла.

Исходя из полученных уравнений можно создать алгоритмическую модель при помощи системы «Simulink», она состоит из комбинации блоков, связанных друг с другом «резиновыми» линиями: блоков, задающих начальные параметры и граничные условия; блока дифференцирования, решающего основное дифференциальное уравнение; блоков отображения информации в графическом и численном виде, блоков переключателей, позволяющих изменить режим работы модели на «нагрев» или «охлаждение» и арифметических блоков для решения уравнений. После чего было проведено исследование модели, в результате которого получены графики переходного процесса, отображающие изменение температуры массивного блока во времени и изменение скорости нагрева массивного блока. При анализе полученных графиков следует вывод о том, что скорость нагрева максимально изменяется в коротком интервале времени от 300 до 500 с.

Результаты работы могут быть использованы при проведении исследований и проектировании теплоэнергетических аппаратов и процессов

Ключевые слова: математическое моделирование, теплопередача, нагрев и охлаждение

Ранее была предложена модель нагрева и охлаждения, которая позволяет определить тепловые потоки в стационарных условиях в системе состоящей из нагреваемого массивного блока и вентилятора [1].

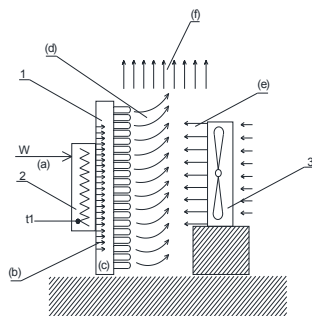


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в физической модели установки нагрева и охлаждения: 1- массивный блок; 2-нагревательный элемент; 3- вентилятор; а - поток тепла, выделяемый нагревателем; б - поток теплопроводности от нагревателя к массивному блоку; в - поток накопления тепла в массивном блоке; д - поток принудительного и конвективного охлаждения массивного блока; е - поток тепла нагнетаемого вентилятором воздуха; ф - поток смешанного нагретого воздуха в окружающую среду

Данную установку можно рассматривать как пример распространения тепловых потоков в условиях неоднородности и неопределенности показателей, как в отдельных элементах установки, так и в окружающей среде [2,3].

Решение задачи определения показателей поиска в таких условиях требует создания обобщенной модели на основании экспериментальных данных [5]. Причем, модель должна быть достаточно гибкой, чтобы была возможность адаптировать ее под различные условия работы установки. Основой для построения такой модели является система математических уравнений, описывающих потоки тепла (рис. 1) [4].

Количество тепла, поступающего на нагреватель (а), определяется выделяемой электрической мощностью:

$$W_{эл} = U \cdot I \quad (1)$$

где U – напряжение, В,

I – сила тока, А.

Количество тепла, накапливаемого в радиаторе (б) определяется уравнением накопления тепла в однородном теле, при допущении, что процессы теплопередачи в этом теле происходят с высокой скоростью по отношению к другим процессам:

$$Q_{нкр} = \Delta T_p \cdot m_p \cdot C_p \quad (2)$$

где ΔT_p – перепад температур массивного блока, рад/°C,

m_p – масса массивного блока, кг,

C_p – теплоемкость массивного блока, град/кг.

Зароченцев Владимир Михайлович – СКГМИ (ГТУ), канд. техн. наук, доцент, e-mail: vlazarm@gmail.com
Кондратенко Татьяна Викторовна - СКГМИ (ГТУ), канд. техн. наук, доцент, e-mail: starikova.tatiana2012@yandex.ru
Макоева Алла Константиновна - СКГМИ (ГТУ), аспирант, e-mail: makoeva_alla@mail.ru

Преобразуем уравнение (2) в дифференциальную форму и получим уравнение скорости накопления тепла в массивном блоке:

$$\frac{dQ_{\text{нкр}}}{d\tau} = \frac{dT_p}{d\tau} m_p \cdot C_p \quad (3)$$

где τ – время нагрева, сек.

Исходя из конструкции установки на рис.1 тепло, выделяемое электронагревателем, разделяется на два потока: потери в окружающую среду и тепло, передаваемые металлическому массивному блоку:

$$Q_{\text{тпр}} + Q_{\text{птн}} = W_{\text{эл}} \quad (4)$$

Принимаем, что количество потерь в окружающую среду (на основе экспериментальных данных) составляет:

$$Q_{\text{тпр}} = k_{\text{птн}} \cdot W_{\text{эл}} \quad (5)$$

где $k_{\text{птн}}$ – расчетный коэффициент потерь,

$$k_{\text{птн}} = 0,3 \quad (6)$$

Наибольшее охлаждение массивного блока получаем при включении вентилятора, подающего холодный воздух на массивный блок:

$$Q_{\text{конв1}} = \alpha_1 \cdot (T_p - T_v) \cdot S_1 \quad (7)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/град,

S_1 – площадь поверхности массивного блока, м^2 .

При использовании вентилятора коэффициент теплоотдачи описывается линейным уравнением, которое было предложено в работе [1]:

$$\alpha_1 = a + b \cdot W_{\text{вент}} \quad (8)$$

где a и b – эмпирические константы.

Поток воздуха, отходящий от обратной стороны радиатора, описывается уравнением конвекции с постоянным коэффициентом теплоотдачи:

$$\alpha_2 = 3 \quad (9)$$

На основании уравнений (1-9) составим полное уравнение теплового баланса системы:

$$\frac{dT_p}{d\tau} \cdot m_p \cdot C_p = W_{\text{эл}} - k_{\text{птн}} \cdot W_{\text{эл}} - \alpha_1 (T_p - T_v) \cdot S_1 - \alpha_2 (T_p - T_v) \cdot S_2 \quad (10)$$

В результате экспериментальных наблюдений были определены значения a и b , вследствие чего уравнение (8) принимает следующий вид:

$$\alpha_1(W_{\text{вент}}) = 2 + 0,03W_{\text{вент}} \quad (11)$$

Модель, состоящая из десяти уравнений, представлена в системе визуального блочного моделирования (рис. 2).

Модель, представленная на рис. 2, включает в себя источники сигналов в виде блоков констант, в которых заложены значения параметров, и начальных условий в блоках констант. С помощью блоков-переключателей «On Power» и «On Air» можно изменять режимы работы установки, переключая режим нагрева или режим охлаждения.

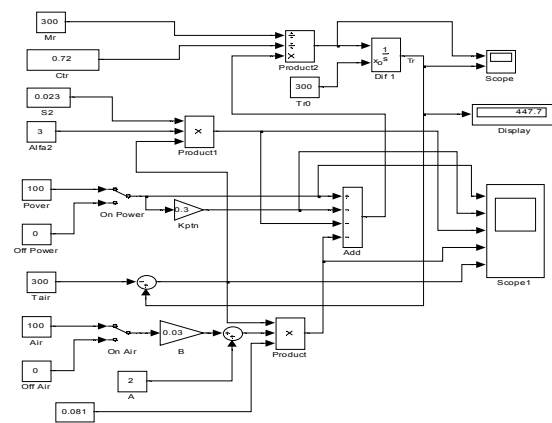


Рис. 2. Алгоритмическая модель распределения тепловых потоков в установке 1 в «Simulink»

Интегрирование дифференциального уравнения (10) модели во времени осуществляется с помощью блока-интегратора «Dif 1», на вход которого поступает скорость изменения температуры, а на выходе рассчитывается температура блока массивного блока. Значение температуры отображается в блоках «Scope» и «Scope 1», а на блоке «Display» в виде числа.

Графики переходного процесса, показывающие нагрев установки приведены на рис. 3 и рис. 4, соответственно изображены изменение скорости нагрева радиатора и изменение температуры, которые получены при моделировании в блоке «Scope».

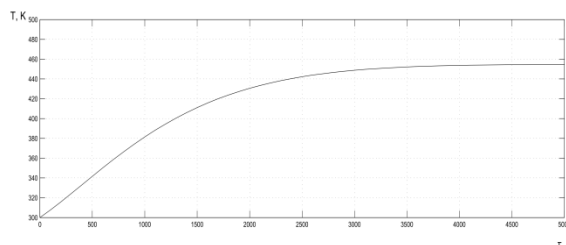


Рис. 3. Изменение температуры массивного блока во времени

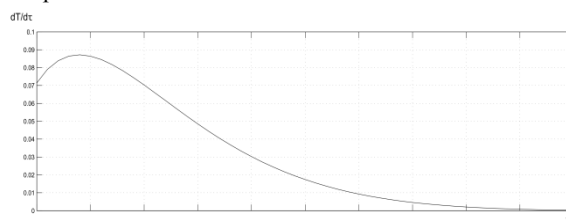


Рис. 4. Изменение скорости нагрева массивного блока во времени

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что скорость нагрева максимально изменяется в коротком интервале от 300 до 500с.

Выводы

В представленной статье, разработана математическая модель, позволяющая исследовать динамические процессы нагрева и охлаждения при свободном распределении тепловых потоков.

Результаты работы могут быть использованы при проведении исследований и проектировании теплоэнергетических аппаратов и процессов.

Литература

1. Исследование и моделирование стационарных условий теплопередачи в системе с электрическим нагревателем и принудительным воздушным охлаждением [Текст] / А.К. Макоева, В.М. Зароченцев, Т.В. Кондратенко, Р.М. Коробкин // Аспирант и соискатель: Журнал актуальной научной информации. – 2016. - №1. – С. 55-58.
2. Очков, В.Ф. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет [Текст] / В.Ф. Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 336 с.

3. Очков, В. Ф. Mathcad-14 для студентов и инженеров: русская версия [Текст] / В.Ф.Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, - 2009. -498с.

4. Енохович, А.С. Справочник по физике [Текст] / А.С. Енохович. – М.: Просвещение, 1978 – 415 с.

5. Компьютерная система управления контурами нагрева и охлаждения [Текст] / В.А. Костенко, Д.В. Матвеев, К. С. Месников, Р.В. Радченко, В.А. Шульженко, М.К. Шубин, В.М. Зароченцев, Т.В. Кондратенко // Ежегодная научно-техническая конференция обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) (НТК-2015): сборник материалов. – Владикавказ: Изд-во «Терек», 2015. – С. 57-59.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)
(г. Владикавказ)

SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN THE SERIES HEATING AND COOLING

V.M. Zarochentsev, associate professor of the North Caucasian mining and metallurgical institute, Russian Federation, e-mail: vlazarm@gmail.com

T.V. Kondratenko associate professor of the North Caucasian mining and metallurgical institute, Russian Federation, e-mail: starikova.tatiana2012@yandex.ru

A.K. Makoeva, graduate student of the North Caucasian mining and metallurgical institute, Vladikavkaz, Russian Federation, e-mail: makoeva_alla@mail.ru

The purpose of the submitted article the mathematical model is development of allowing investigating the dynamic processes of heating and cooling of the large block under the heat fluxes free distribution.

The physical analog offered earlier consists of a large block, a heating element and a fan which allows to define heat fluxes in the steady-state conditions. The solution of heat fluxes indexes definition problem in such conditions demands development of the generalized model on the basis of the experimental data. At the same time, the model must be rather flexible to adapt it to the various operating conditions of installation. The basis for creation of such a model is the system of the mathematical equations describing heat streams.

Proceeding from the received equations, it is possible to create algorithmic model by means of the "Simulink" system, which consists of a combination of the blocks connected with each other with "rubber" lines: the blocks setting initial parameters and boundary conditions; the block - derivation solving the constitutive differential equations; blocks - display of information in the graphic and numerical presentation, blocks - switches allowing changing the model duty to "heating" or "cooling" and arithmetic blocks for the equations solution. Then the model research resulted in the schedules of transition phenomenon displaying temperature change of the large block in time and heat rate change of the large block was conducted. The analysis of the received schedules showed that the heating rate changes rapidly in a short time from 300 to 500 c.

The work results can be used during the research process and projection of heat power devices and processes

Key words: mathematical modeling, heat transfer, heating and cooling

References

1. Makoeva, A.K., Zarochentsev, V.M., Kondratnko, T.V., Korobkin, R.M. Issledovanie i modelirovanie stacionarnykh usloviy teploperedachi v sisteme s jelektricheskim nagrevatelem i prinuditel'nym vozdushnym ohlazhdeniem [Research and simulation of stationary heat transfer conditions in the system with an electric heater and forced air cooling] // Actual Scientific Information Journal "aspirate and competitor" Publishing house "Sputnik +», №1, 2016 - С. 55-58.
2. Ochkov, V.F.. Teplotekhnicheskie jetjudy s Excel, Mathcad i Internet [Thermal studies with Excel, Mathcad, and Internet]/ V.F.Ochkov. – SPb.: BHV-Peterburg, 2014. –336 s.
3. Ochkov, V. F. Mathcad-14 dlja studentov i inzhenerov: russkaja versija [Mathcad-14 for students and engineers: Russian version] / V.F.Ochkov. – SPb.: BHV-Peterburg, - 2009. -498p.
4. Enohovich, A.S.. Spravochnik po fizike [Directory of physics]. – M.: Prosveshheie, 1978 – 415 p.
5. Kostenko, V. A., Matveev, D. V., Mesnikov, K. S., Radchenko, R. V., Shul'zhenko, V. A., Shubin, M. K., Zarochentsev V. M., Kondratenko T. V. Komp'yuternaja sistema upravlenija konturami nagreva i ohlazhdenija.»: Sbornik materialov [Computer control system circuits of heating and cooling "». Collection of materials]/ – Vladikavkaz: Severo-Kavkazskij gorno-metallurgicheskij institut (gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet). Izd-vo «Terek», 2015 – pp. 57-59.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

А.Е. Кишалов, К.В. Маркина

Статья посвящена исследованию изменения основных газодинамических параметров на входе и выходе из основной и форсажной камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей различных схем в зависимости от года их разработки. Данные параметры позволяют оценить габаритные размеры камер сгорания, степень их совершенства, проанализировать параметры процесса горения (процессы подготовки топливно-воздушной смеси, стабилизации пламени и горения).

Проанализировано более 100 авиационных газотурбинных двигателей отечественного и зарубежного производства, различного типа, схем и принципов действия с 1948 года по настоящее время (ТРД, ТРДФ, ТРДДФ). Составлены их термогазодинамические модели в системе имитационного моделирования DVIgW, определены недостающие параметры.

В результате исследования определены аппроксимирующие зависимости основных параметров на входе и выходе из камер сгорания в зависимости от года разработки двигателя, которые позволяют спрогнозировать параметры камер сгорания для перспективных изделий.

Подобные исследования позволят уточнить применяемые в серийном и опытном производстве математические модели камер сгорания и двигателей в целом, что позволит ускорить цикл разработки новой авиационной техники гражданского и военного назначения, сократит объём экспериментально-доводочных исследований, позволит повысить эффективность эксплуатации проектируемой техники

Ключевые слова: термогазодинамическое моделирование, авиационные газотурбинные двигатели, горение, камера сгорания, основные параметры и характеристики

Авиационный газотурбинный двигатель (ГТД) – это сложный технический объект, сочетающий в себе последние достижения и разработки из многих отраслей науки и техники. Основным узлом ГТД является камера сгорания (КС), в которой осуществляется процесс преобразования химической энергии топлива в тепловую и потенциальную энергию рабочего тела. У двигателей для военных высокоманевренных самолетов обычно устанавливается форсажная камера (ФК), которая располагается за его турбинами. КС и ФК ГТД являются наиболее сложными и ответственными узлами, от степени совершенства которых во многом зависят основные параметры всего авиационного двигателя (АД), его надежность и ресурс. Сложность проектирования этих узлов заключается не только в чрезвычайно высоких температурах рабочего процесса, но и в сложности самих процессов: распыла, испарения, смешения топлива с воздухом и самого горения.

Процесс горения в значительной степени зависит от параметров на входе в КС. При изменении режима работы двигателя, при полёте с различными скоростями и на

различных высотах изменяются параметры горения и характеристики КС и ФК. По мере развития АД и совершенствования их конструкции, параметры на входе и выходе из «горячих» узлов также претерпевают изменение, что сказывается на конструкции КС и ФК и даёт толчок к применению новых технологий и подходов.

Целью статьи является анализ параметров потока КС и ФК в авиационных воздушно-реактивных двигателях (ВРД) прямой тяги с малой степенью двухконтурности ($m = 0-2$) в зависимости от года изготовления разработки на максимальном и форсированном взлётных режимах.

Прогноз газодинамических характеристик КС и ФК

Для анализа были исследованы параметры на входе в КС (на выходе из компрессора), которые определяют параметры процесса горения и характерные размеры КС (давление и температура), параметры на выходе из КС (температура, коэффициент избытка воздуха) [1]. Для ФК исследовались давление, температура, коэффициент избытка воздуха на входе; на выходе – температура и давление. Перечисленные параметры были получены в результате расчёта в системе имитационного моделирования (СИМ) DVIgW [2]. Анализируя изменения параметров потока в зависимости от года разработки и поколения двигателя можно предсказать соответствующие параметры для будущих поколений [3, 4].

Кишалов Александр Евгеньевич – УГАТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: kishalov@ufanet.ru
Маркина Ксения Васильевна – УГАТУ, ассистент, e-mail: markina_kseniya@mail.ru

Разработанные модели двигателей (рис. 1 и 2, табл. 1) в СИМ DVIGw были идентифицированы по данным открытых источников, на максимальном и форсированных взлётных режимах [5, 6].

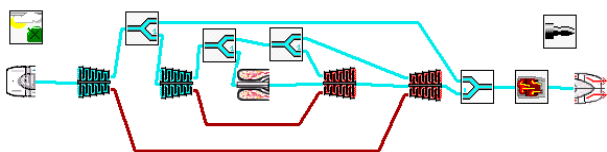


Рис. 1. Топологическая модель ТРДДФ F119-PW-100

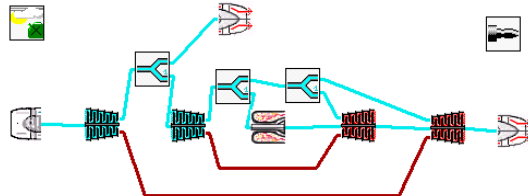


Рис. 2. Топологическая модель ТРДД АИ-25

Результаты моделирования АД в зависимости от года разработки и поколения двигателя представлены на рис. 3–9 [7, 8].

Анализ результатов моделирования

Из анализа проведенных результатов [9], представленных на рис. 3, видно, что полная температура на выходе из компрессора (T_K^*) растет с увеличением года разработки и с ростом поколения. Температура выходе из компрессора увеличивается из-за увеличения степени повышения давления (π_K), что можно увидеть увеличению по давления на выходе из компрессора (p_K^* , рис. 4). Как правило, с увеличением года разработки и поколения двигателя увеличивается степень совершенства его узлов, а с ростом КПД компрессора (η_K) температура немного падает. Максимальная температура и давление за компрессором – у двигателя F136.

Таблица 1

Поколения авиационных ГТД

Поколение (год разработки)	Схема двигателя	Двигатели
I (1948–1959 гг.)	ТРД	АМ-ТКРД-01, АМ-ТРД-02, АМ-3, ВД-7, АМ-5, АЛ-5
	ТРДФ	ВК-1Ф, GE1/J1A1, 356-34B
	ТРДДФ	ВК-3
II (1953–1970 гг.)	ТРДФ	P11-300, P11Ф-300, P11Ф2-300, P11Ф2С-300, P15-300, АЛ-7Ф-1, GE4, GE4/J5, GE4/J5P, J85-13A, E-300A, АЛ-7Ф2, АЛ-7Ф4, J85-15, Atar 9K-50, J85-21, J58-P- 4, J79-11A, J79-10, P13-300, P15Б-300, J79-19, J79-17
	ТРД	ВД-7Б, КРД-26, КР7-300
	ТРДД	НК-8-4, АИ-25, НК-8-2, АИ-25ТЛ, НК-8-2У
	ТРДДФ	Adour RT.172, M.53-02, M.53-5
III (1957–1979 гг.)	ТРДДФ	НК-6, НК-144, F100-PW-100, RB.199, НК-22/НК-23, F101-GE-100, Adour Mk.102, F101-GE-102, НК-144A, Adour 58, НК-144B, НК-32-1, F100-PW-220, F401-PW-400, M.53-P2, Adour Mk.804, J79-GE-119
	ТРДФ	P27-300, P27Ф2-300, АЛ-21Ф, АЛ-21Ф-3, АЛ-21Ф-3А, P29-300, P25-300, P29Б-300, Olympus 593 МК 602, Olympus 593, J97
	ТРДД	ДВ-2, ДВ-2Б, НК-86, НК-8-4К
IV (1971–2008 гг.)	ТРДДФ	НК-25, F404-GE-400, НК-32, F110-GE-100, F110-GE-400, F404-GE-100, F125, Д-30Ф6, PW1120, M.85, F110-GE-129, F100-PW-229, АЛ-31Ф, F404.RM.12, EJ200, АЛ-41Ф, J101/SF, АЛ-55Ф
	ТРДД	АИ-222-25, АИ-222-28, АЛ-55
IV+ (1988–2000 гг.)	ТРДДФ	АЛ-31ФП, IPE-92, IPE-94, JSF119, F136, F110-GE-129EFE, F110-GE-132, F100-PW-229A
IV++ (2005 г.)	ТРДДФ	АЛ-41Ф-1
V (1991 – 2016 гг.)	ТРДДФ	F119-PW-100, F135, F414-GE-400, АЛ-41Ф2

Чем выше температура и давление (на входе в КС), тем проще организовать процесс горения (параметры приближаются к точке самовоспламенения топлива), топливо испаряется лучше, а требуемые габаритные размеры КС (для обеспечения заданной полноты сгорания) уменьшаются. С другой стороны, увеличение T_K^* дает сложности с охлаждением жаровой трубы, корпуса КС и лопаток турбин.

На рис. 5 и 6 приведены температуры ($T_{КС}^*$) и коэффициент избытка воздуха ($\alpha_{КС}$) на выходе из КС. По мере увеличения года разработки и поколения двигателя температура за КС растет (что обеспечивается совершенствованием системы охлаждения лопаток турбины и применением новых материалов), а коэффициент избытка воздуха, соответственно, уменьшается. При разработке КС стараются обеспечить максимальную температуру за КС, которую могут выдержать элементы турбины (что увеличивает КПД цикла тепловой машины). Максимальная температура в КС у двигателей V поколения – F119-PW-100 и F135 (по данным открытых источников и результатов моделирования).

На рис. 7 и 8 приведены температуры и давления на входе в ФК. Оба параметра растут с увеличением года и поколения. Чем выше температура и давление, тем проще

организовать процесс горения (параметры приближаются к точке самовоспламенения топлива). Чем ниже температура на входе в ФК, тем больше энергии можно подвести к потоку и, соответственно, тем выше степень форсирования двигателя (что характерно для двигателей ранних поколений). Как правило, у одноконтурных двигателей температуры на входе в ФК выше. У двухконтурных двигателей за счет смешения воздуха внутреннего и наружного контуров температуры на входе в ФК ниже. Наличие смесителя перед ФК, как правило, усложняет конструкцию и ухудшает условия горения (за счет высокой неравномерности параметров потока в зоне горения). Минимальная температура на входе в ФК у двигателей ДВ-2Б, НК-25, F101-GE-100 и F101-GE-102 (ТРДДФ со степенью двухконтурности порядка $m = 1,5-2,0$). Максимальные температуры на входе в ФК – у ТРДФ II поколения – J85-21. Уровень давления на входе в ФК на порядок ниже, чем на входе в КС, из-за этого возникают дополнительные сложности с организацией процесса горения. Чем больше давление на входе в ФК, тем меньше габаритные размеры ФК. Максимальное давление у двигателя V поколения – F119-PW-100.

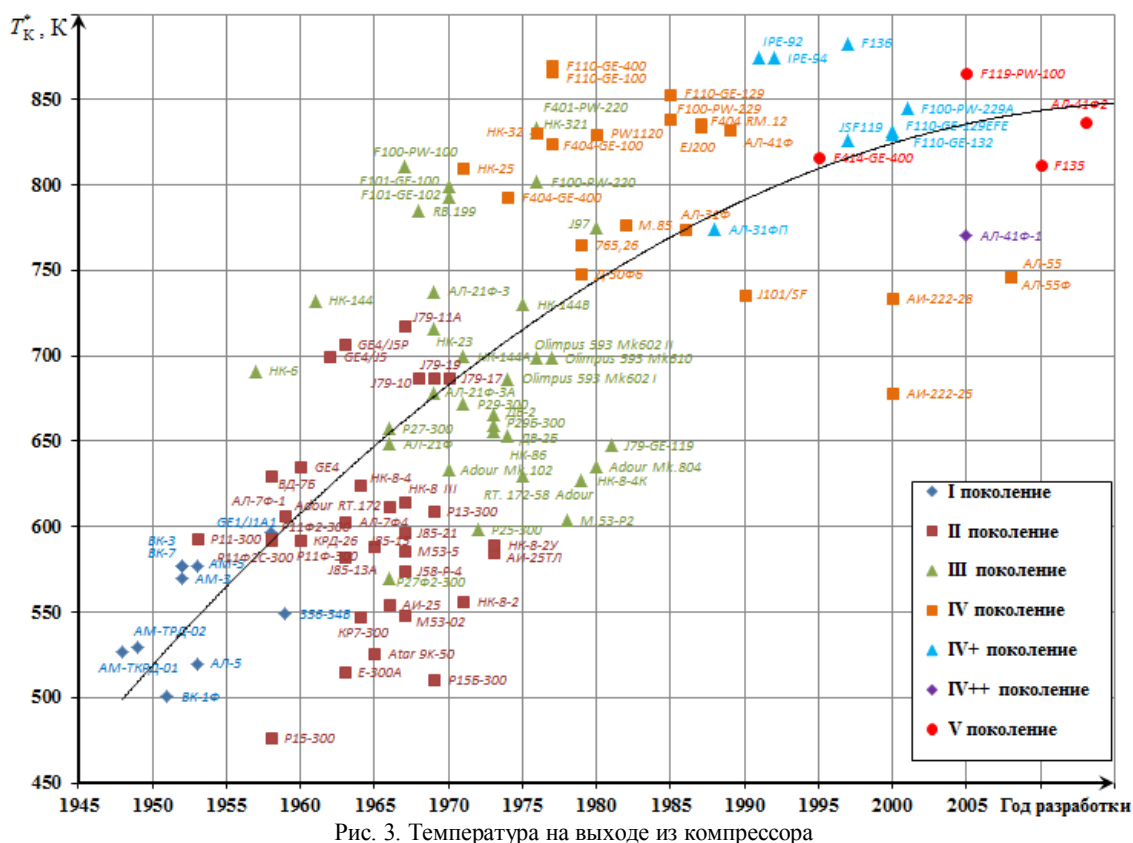
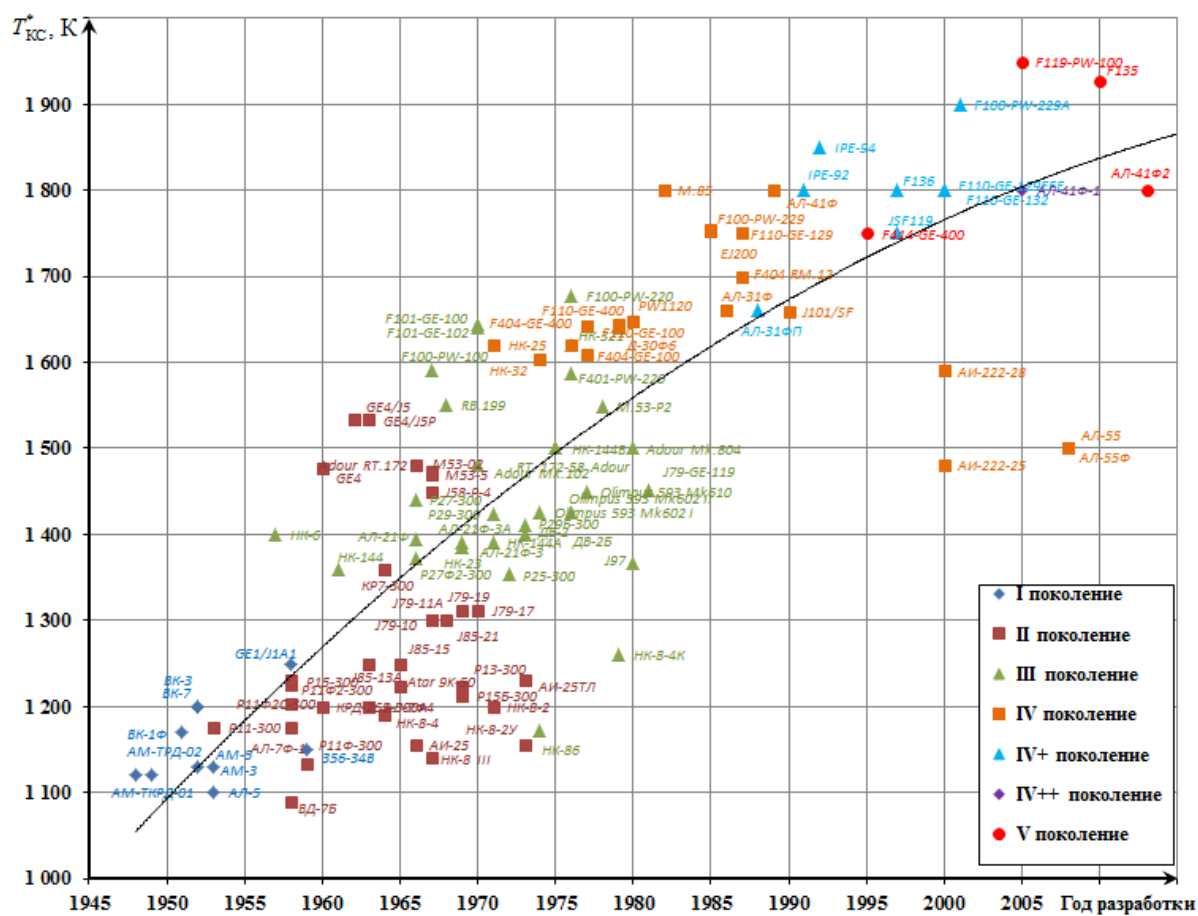
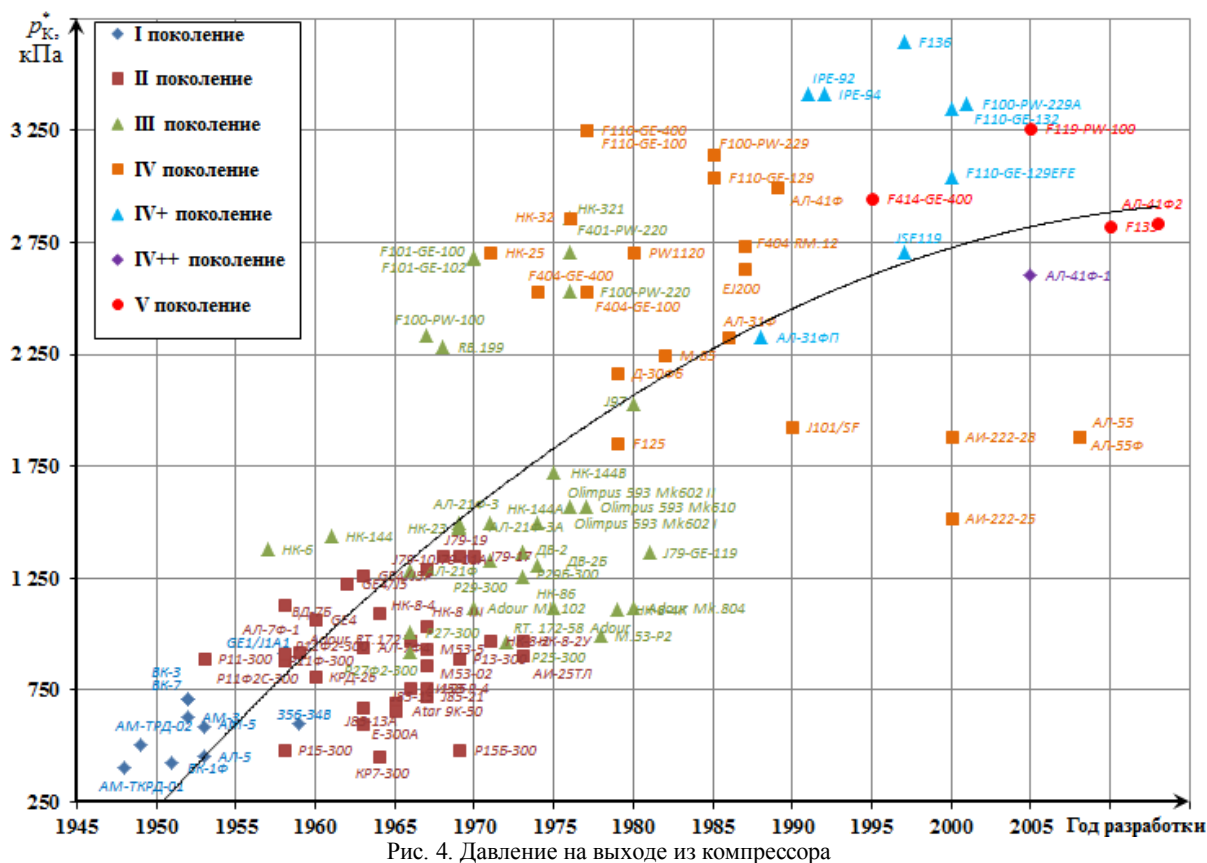


Рис. 3. Температура на выходе из компрессора



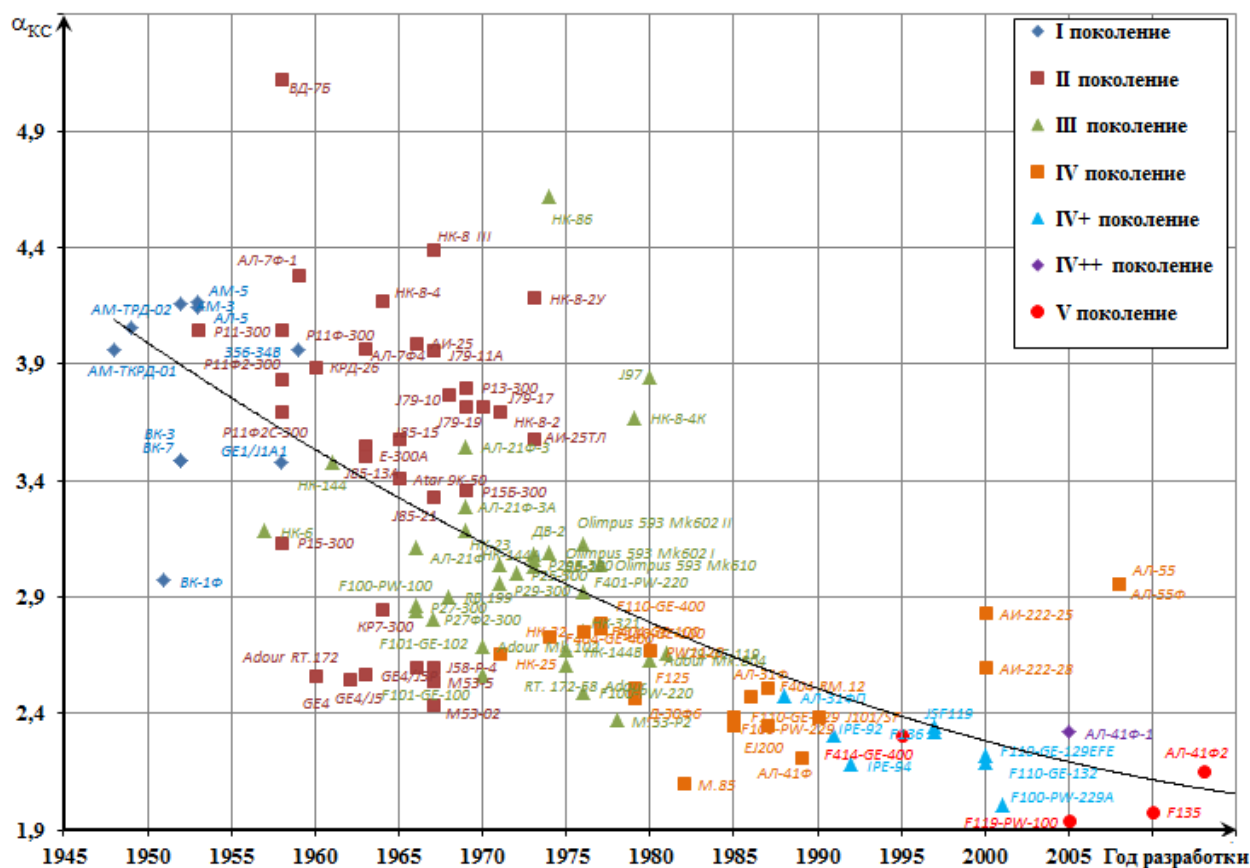


Рис. 6. Коэффициент избытка воздуха на выходе из КС

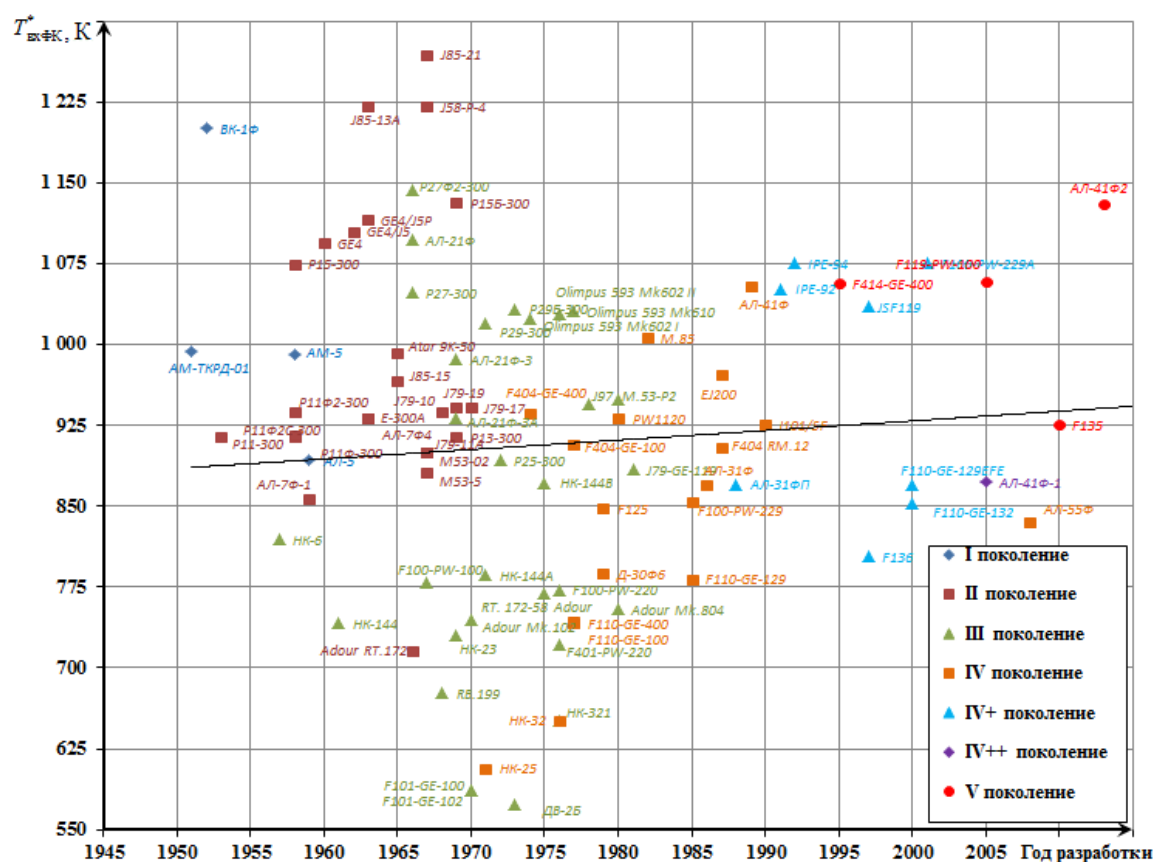
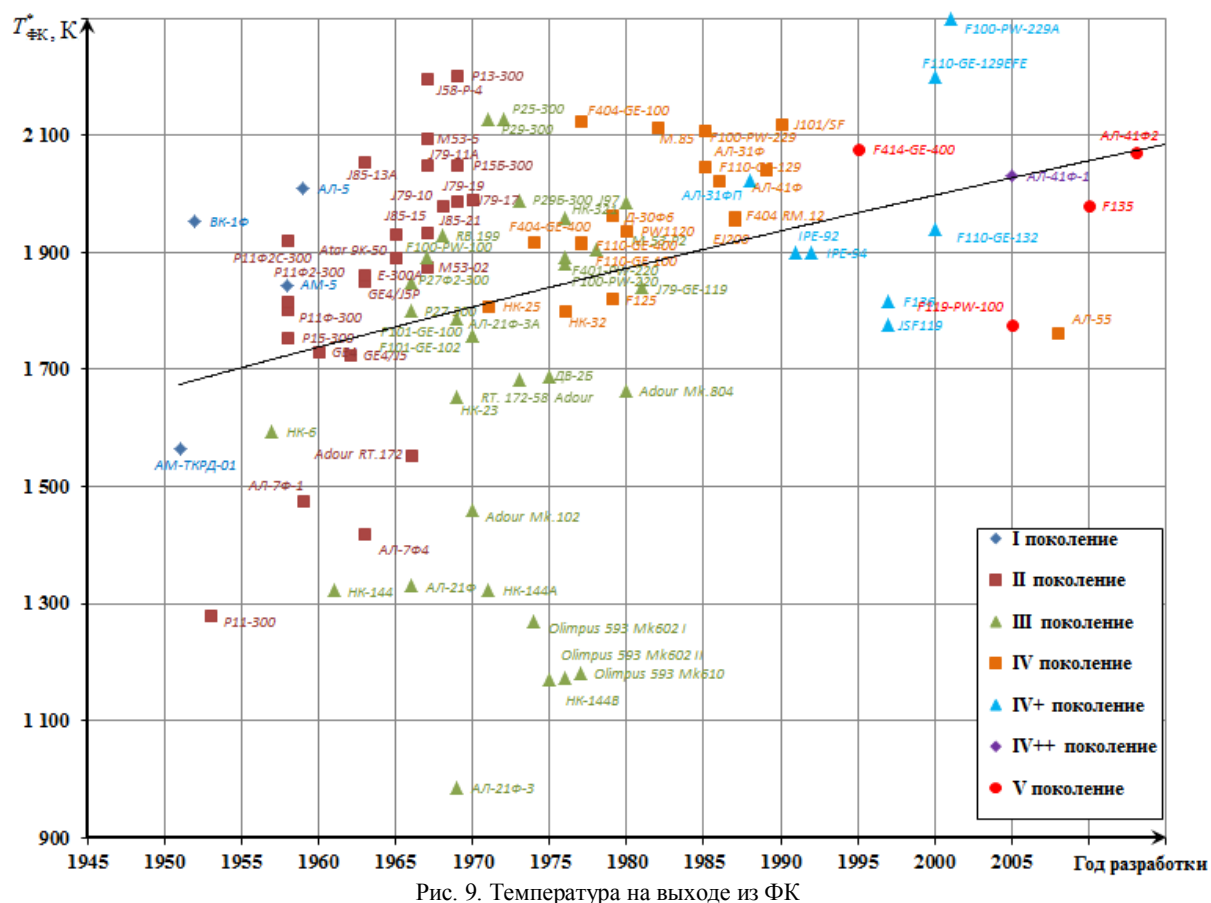
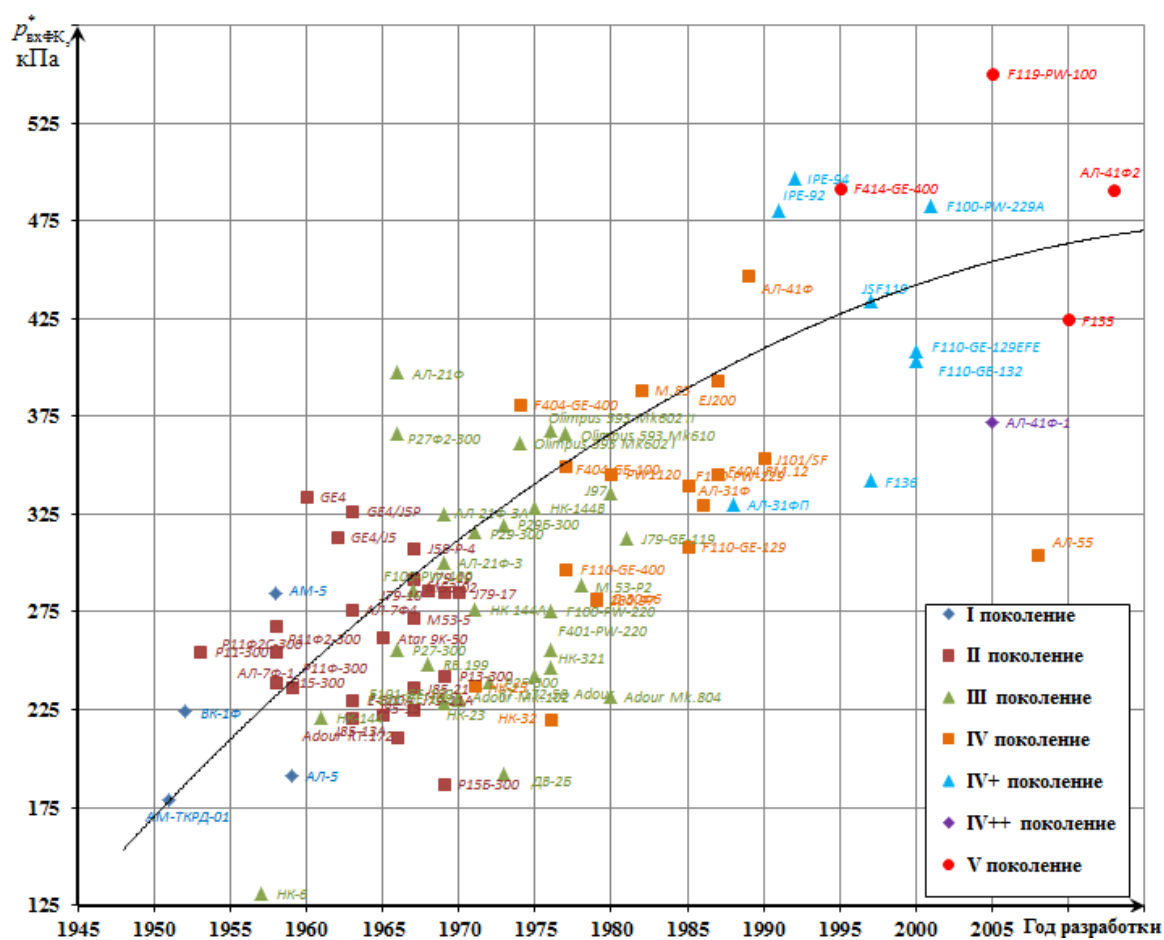


Рис. 7. Температура на входе в ФК



На рис. 9 приведены температуры на выходе из ФК, уровень которых значительно выше температур за КС. Это связано с тем, что за ФК нет таких теплонапряжённых высоконагруженных узлов, как турбина. С увеличением года разработки и поколения двигателя наблюдается рост температур на выходе из ФК. Чем выше температура, тем выше эффективность цикла, больше тяга и большие скорости истечения из сопла (что позволяет достичь больших скоростей полета). При этом возникают сложности с охлаждением корпуса и жаровой трубы ФК, элементов реактивного сопла. Параметры смеси приближаются к стехиометрическим, что вызывает дополнительные сложности при организации процесса горения. Большая величина теплоподвода в ФК вызывает уменьшение теплового коэффициента полного давления. Максимальная температура у двигателя – F100-PW-229A. Также можно отметить, что у двигателей для гражданской и транспортной авиации значения суммарной степени повышения давления выше, а температуры за КС ниже, чем у двигателей для военных высокоманевренных самолетов.

В табл. 2 представлены полученные аппроксимирующие зависимости и прогноз значений рассчитанных параметров для $\tau = 2020$ год.

Изменение данных параметров было проанализировано на взлетном максимальном и форсированном режимах [9]. При проектировании КС и ФК необходимо обеспечить устойчивое горение во всем диапазоне режимов, высот и скоростей. При полётах на больших высотах и с различными скоростями параметры на входе в данные узлы могут меняться значительно. Для дальнейшего более точного анализа изменения параметров КС и ФК необходимо провести расчеты высотно-скоростных характеристик данных двигателей.

По рассмотренным параметрам двигателей в зависимости от года разработки построены аппроксимирующие зависимости (табл. 2). Относительные погрешности аппроксимирующих зависимостей для двигателей IV–V поколений составили порядка 30%. Определены прогнозные значения соответствующих параметров потока в КС и ФК для перспективного двигателя, который будет разработан в $\tau = 2020$ г.

Таблица 2

Прогноз на 2020 год

Параметр	Формула	Прогноз	Относительная погрешность прогноза для IV – V поколений
Тем-ра на выходе из компрессора, К	$T_K^* = -0,069\tau^2 + 282\tau - 284212$	853	0,2...19,0 %
Давление на выходе из компрессора, кПа	$p_K^* = -0,571\tau^2 + 2307\tau - 2326144$	2930	0,7...68,7 %
Тем-ра на выходе из КС, К	$T_{КС}^* = -0,105\tau^2 + 427\tau - 433503$	1890	0,2...17,8 %
Кэф-т избытка воздуха на выходе из КС	$\alpha_{КС} = -0,0003\tau^2 + 1,185\tau - 1207$	2,0	0,2...37,8 %
Тем-ра на входе в ФК, К	$T_{вхФК}^* = 133,8e^{0,00097\tau}$	947	0,2...32,9 %
Давление на входе в ФК, кПа	$p_{вхФК}^* = -0,055\tau^2 + 222\tau - 224896$	474	0,4...36,3 %
Тем-ра на выходе из ФК, К	$T_{ФК}^* = -0,012\tau^2 + 55\tau - 59172$	2110	0,1...32,3 %

Выводы

В результате исследования проведено моделирование 112 авиационных ВРД прямой тяги с малой степенью двухконтурности (ТРД, ТРДД, ТРДФ и ТРДДФ) I–V поколений отечественного и зарубежного производства. Проанализировано изменение параметров потока в КС и ФК, в зависимости от поколения и года разработки двигателя. Установлены аппроксимирующие зависимости соответствующих параметров, даны прогнозные значения для перспективного двигателя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00077 мол.а.

Литература

1. Обзор и анализ параметров потока в основных узлах авиационных двигателей [Текст] / Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов, Ю.А. Шабельник, К.В. Маркина, Н.И. Полежаев // Молодежный Вестник УГАТУ. – 2012. – № 4 (5) – С.25-36.
2. Кривошеев, И.А. Имитационное моделирование работы авиационных ГТД с элементами систем управления [Текст] / И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов // Вестник УГАТУ. – 2008. – №2 (29) Сер. Машиностроение. – С. 3–11.

3. Кишалов, А.Е. Моделирование и анализ характеристик ТРДДФсм для самолётов V поколения в системе DVIGw [Текст] / А.Е. Кишалов, Н.А. Ключев // Мавлютовские чтения: материалы X Всерос. молодёжной науч. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.199-203.

4. Krivosheev I.A. The Thermo-Gas-Dynamic Modeling of Afterburning Turbofan Engine for High Maneuverable Aircraft Combined with Its Automatics [Text] / I.A. Krivosheev, A.E. Kishalov, D.G. Kozhinov // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) Procedia Engineering. – 2016, vol. 150, pp. 126–131.

5. Кишалов, А.Е. Параметрическая идентификация математической модели ГТД в системе DVIGw [Текст] / А.Е. Кишалов, Е.С. Власова // Мавлютовские чтения: материалы Всерос. науч. конф. – Уфа: УГАТУ, 2007. – Т.1. – С. 56–57.

6. Кривошеев, И.А. Использование методов идентификации на различных этапах жизненного цикла

технических систем [Текст] / И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов, К.Е. Рожков // Вестник ИрГТУ – Иркутск, 2013. – С. 25–33.

7. Прогноз основных характеристик ТРДДФсм для перспективных авиационных комплексов [Текст] / В.С. Жернаков, И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов, К.В. Маркина, В.Д. Липатов // Вестник УГАТУ. – 2015. №2 (68). – С.56-62.

8. Ахмедзянов, Д.А. Моделирование переходных процессов, протекающих при отладке автоматики при испытаниях ТРДДФ [Текст] / Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. Т.7. - № 8. –С.152-158.

9. Кишалов, А.Е. Анализ газодинамических параметров камер сгорания авиационных ГТД [Текст] / А.Е. Кишалов, К.В. Маркина // Молодой ученый. - 2016. - №24 (128). – С. 79-84.

Уфимский государственный авиационный технический университет

RESEARCH AND PREDICTION OF THERMAL GAS PARAMETERS FLOW COMBUSTION CHAMBERS OF AVIATION GTE

A.E. Kishalov, Candidate of Technical Sciences, associate Professor, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, mail: kishalov@ufanet.ru

K.V. Markina, assistant, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation, e-mail: markina_kseniya@mail.ru

The article investigates the changes of gas-dynamic parameters at the inlet and outlet of the main combustion chamber and afterburner aircraft gas turbine engines various schemes depending on the year of their development. These parameters allow assess the dimensions of the combustion chambers, the degree of their perfection, to analyze the parameters of the combustion process (the processes of preparing the fuel-air mixture, flame stabilization and combustion processes).

Were analyzed more than 100 aircraft gas turbine engines native and foreign production of various types of schemes and principles of action from 1948 to the present time (turbojet engine, afterburning turbojet engine, afterburning turbofan engine). Compiling them thermal-gas model simulation system DVIGw, are defined the missing parameters.

A result of research are defined the main parameters approximate depending on the input and output of the combustion chambers, depending on the engine, the design, which allows to predict parameters for combustion chambers for perspective products.

Such research will allow to specify applicable in serial and pilot production mathematical models of combustion chambers and the engine as a whole, which will accelerate the development cycle of new aircraft of civil and military purposes, reduce the amount of experimental and finishing research, will enhance the operational efficiency of the designed technology

Key words: thermal gas modeling, aviation gas turbine engines, combustion, combustion chamber, main parameters and characteristics

References

1. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Shabelnik J.A., Markina K.V., Polezhaev N.I. Obzor i analiz parametrov potoka v osnovnyh uzлах aviacionnyh dvigatelej [Review and analysis of flow parameters in the main nodes aviation engines] // Youth herald USATU – Ufa: USATU, 2012. No. 4 (5) – pp.25-36.

2. Krivosheev I.A., Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Imitacionnoe modelirovanie raboty aviacionnyh GTD s jelementami sistem upravlenija [Imitation modeling of gas turbine engines with controls systems] // Vestnik UGATU. – Ufa: USATU, 2008. No. 2 (29) – pp. 3–11.

3. Kishalov A.E., Klyuchev N.A. Modelirovanie i analiz harakteristik TRDDFsm dlja samoljotov V pokolenija v sisteme DVIGw [Simulation and analysis performance for afterburning turbofan engine airplanes V generation system DVIGw] // Mavlyutovskie readings: Materials of All-Russian Youth Scientific Conference « Mavlyutovskie readings ». – Ufa: USATU, 2016. – pp.199-203.

4. Krivosheev I.A., Kishalov A.E., Kozhinov D.G. The thermo-gas-dynamic modeling of afterburning turbofan engine for high maneuverable aircraft combined with its automatics // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) Procedia Engineering. 2016. – vol. 150. – pp. 126–131.
5. Kishalov A.E., Vlasova E.S. Parametricheskaja identifikacija matematicheskoy modeli GTD v sisteme DVIGwp [Parametric identification of the mathematical model of gas turbine engine system in DVIGwp] // All-Russian NTK «Mavlyutovskie readings». – Ufa: USATU, 2007. T.1. – pp.56–57.
6. Krivosheev I.A., Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Rozhkov K.E. Ispol'zovanie metodov identifikatsii na razlichnykh etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh sistem [The use of methods of identification at various stages of the life cycle of technical systems] // Proceedings of Irkutsk State Technical University – Irkutsk, 2013. – pp.25–33.
7. Zhernakov V.S., Krivosheev I.A., Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Markina K.V., Lipatov V.D. Prognoz osnovnykh harakteristik TRDDFsm dlja perspektivnykh aviacionnykh kompleksov [Prediction the main characteristics of afterburning turbofan engine for promising aircraft systems] // Vestnik UGATU. – Ufa: USATU, 2015. No. 2 (68). – pp.56-62.
8. Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E. Modelirovanie perehodnykh processov, protekajushchih pri otladke avtomatiki pri ispytaniyakh TRDDF [Modelling of transients occurring when you debug automation at afterburning turbofan engine test] / The Bulletin of VSTU. – Voronezh, 2011. vol.7(8). – pp.152-158.
9. Kishalov A.E., Markina K.V. Analiz gazodinamicheskikh parametrov kamer sgoraniya aviacionnykh GTD [Analysis of the gas-dynamic parameters GTE combustion chambers] / Young scientist – Chita, 2016. No. 24(128) – pp. 79-84.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕРГЕНЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЛОЖНОСТИ LDPC-ДЕКОДИРОВАНИЯ

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова

В этой статье представлена архитектура декодирования на основе кодов с низкой плотностью проверок на четность, в которой используется пороговое правило, чтобы решить, должен ли переменный узел LDPC-декодера обновить свою информацию в последующих итерациях процесса декодирования, или рассматриваться как сходимость (конвергенция). Показано, что при выборе этого порога соответствующим образом сложность декодирования может быть значительно снижена только с незначительным ухудшением характеристик коррекции ошибок. Здесь вводится метод «принудительного сближения» (FC), чтобы уменьшить количество активных узлов на итерацию, который в свою очередь, уменьшает общую сложность декодирования. Представлена новая архитектура LDPC-декодера, придуман подход "принудительной конвергенции". Говоря о понятии, что большое число узлов сходится очень быстро в процессе передачи сообщений, используем пороговое правило для идентификации узлов, которые уже имеют сильную "уверенность" в их вероятности нахождения в состоянии 0 или 1. Эти узлы отключены, и их соответствующие сообщения больше не обновляются, что приводит к снижению сложности декодирования. Полученные результаты показывают, что принудительная конвергенция является мощным средством уменьшения вычислительной сложности LDPC-декодирования

Ключевые слова: высокая пропускная способность, LDPC-декодер, низкая сложность, алгоритм передачи сообщения

Введение. Коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) в последнее время используются как возможный вариант для прямого исправления ошибок (FEC) в будущих системах беспроводной связи. Одним из факторов, влияющих на решение о том, чтобы использовать специфическую FEC технику в системе, является ее пригодность для реальных систем времени и, следовательно, ее вычислительная сложность. В этой статье мы представляем архитектуру декодирования LDPC-кода, в котором мы используем пороговое правило, чтобы решить, должен ли переменный узел LDPC-декодера обновить свою информацию в последующих итерациях процесса декодирования или рассматриваться как узел сходимости. Показано, что при выборе этого порога соответствующим образом сложность декодирования может быть значительно снижена только с незначительным ухудшением характеристик коррекции ошибок.

Коды LDPC определены разреженной матрицей контроля по четности H . Галлагера, рассматривающей только регулярные коды, т.е. коды с фиксированным числом ненулевых элементов в строках и столбцах H соответственно. Тем не менее значительное улучшение битовых ошибок может быть достигнуто путем использования нерегулярных кодов [3]. Различные алгоритмы, используемые для декодирования LDPC (распространения доверия (BP), декодирование min-sum и их различные вариации) итеративно приближают решения максимального правдоподобия проблемы декодирования, т.е. задач нахождения кодового слова с

минимальным евклидовым расстоянием от принятого сигнала.

LDPC-декодирование осуществляется путем передачи сообщений по ребрам между узлами двудольного графа Таннера, который представляет собой матрицу проверки на четность LDPC-кода (рис. 1). Средняя сложность процесса декодирования, следовательно, зависит от трех факторов:

- 1) число операций на узел,
- 2) среднее число итераций, и
- 3) количество активных узлов в каждой итерации.

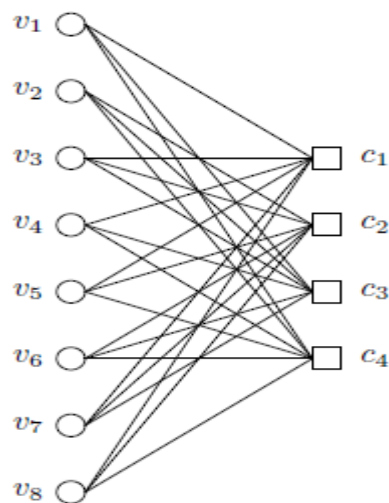


Рис. 1. Граф Таннера, представление длины блока 8, (3,6) регулярного LDPC-кода

Сложность вычислений, небольшое количество операций и точность этих расчетов – решающие значения для выполнения коррекции ошибок. Обратим внимание на первый из приведенных трех факторов, который является перспективным способом быстрого исправления ошибок. Уменьшение

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kibr@vorstu.ru
Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru

среднего числа итераций путем уменьшения максимального числа итераций также не является действенным способом, так как в этом случае возможность исправления ошибок уменьшается очень быстро.

Стандартное LDPC декодирование. Граф Таннера LDPC кода (рис. 1) содержит два типа узлов - переменные узлы v_i , представляющие биты кодового слова (обычно с левой стороны) и c_j контрольными узлами, представляющие ограничения, налагаемые путем проверки четности (обычно на правой стороне). Два типа узлов v_i и c_j соединены, если $h_{i,j} \neq 0$, то есть бит кода i проверяется при j -й проверке. Узлы на левой стороне представляют собой кодовые биты, узлы на правой стороне – проверочные ограничения. На протяжении всего процесса декодирования узлы обмениваются сообщениями $Q_{v,c}^{(a)}$ и $R_{v,c}^{(a)}$ с соседними узлами по ребрам графа Таннера.

В начале процесса декодирования каждый переменный узел инициализируется с соответствующим мягким выходом f_i^a от детектора канала, где f_i^a обозначает апостериорную вероятность, что переменная i находится в состоянии a , обусловленном наблюдаемым выходом канала. Затем выполняется последовательное декодирование с передачей сообщения от одной стороны графа Таннера к другой.

В течение первой половины итерации каждый переменный узел v_i передает «доверие», что находится в состоянии a , учитывая входы от всех соседних контрольных узлов $c_{j'}, j' \neq j$ (обозначим как $Q_{i,j}^a$) к проверочному узлу c_j . В течение второй половины итерации каждый проверочный узел c_j посылает свою вероятность, что «удовлетворен» (обозначается как $R_{i,j}^a$), принимая во внимание доверие $Q_{i',j}^a$ всех других смежных переменных узлов $v_{i'}, i' \neq i$ к переменному узлу v_i . Нетрудно убедиться, что для двоичного LDP-кода $Q_{i,j}^0 + Q_{i,j}^1 = 1$ и $R_{i,j}^0 + R_{i,j}^1 = 1$. Отсюда вероятность сообщений домена определяется следующим образом:

$$R_{j,i}^0 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \prod_{i', i' \neq i} (1 - 2Q_{i',j}^1), \quad R_{j,i}^1 = 1 - R_{j,i}^0$$

$$Q_{i,j}^a = k_{i,j}^a f_i^a \prod_{j', j' \neq j} R_{j',i}^a \quad (1)$$

где $k_{i,j}^a = (Q_{i,j}^0 + Q_{i,j}^1)$ используется для соответствующей нормализации.

Эти вычисления также можно определить для логарифмической области, преобразуя умножение и деление на сложение и вычитание, которые, как правило, желательны для осуществления целей (с

точки зрения циклов процессора, а также требуемой точности).

Передача сообщений повторяется до тех пор, пока все проверки не выполняются (успешное декодирование) или пока не достигнуто максимальное число итераций, и должен быть объявлен отказ декодирования. Следует отметить, что таким образом могут быть обнаружены ошибки декодирования, и для достаточно больших длин блоков, число невыявленных ошибок очень низко. Тем не менее число итераций декодера не фиксировано. На самом деле, среднее число итераций декодера, как правило, довольно низко по сравнению с максимальным числом итераций. Эта переменная задержка декодирования является одной из главных недостатков LDPC декодеров для реализаций в режиме реального времени, так как это требует больших буферов, так как каждый декодер будет предназначен для средней пропускной способности и должен хранить информацию для следующих блоков каждый раз, когда текущий блок имеет большую задержку декодирования.

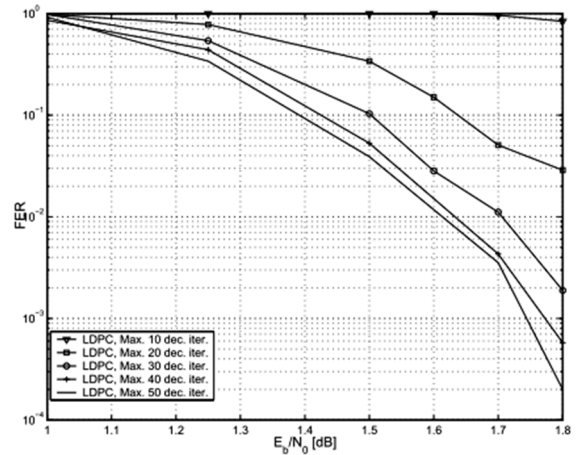


Рис. 2. Частота кадров ошибки со скоростью 1/2, длина блока 4000, (3,6) регулярным LDPC кодом на канале АБГШ. Производительность явно улучшается за счет увеличения числа максимальным числом итераций

Влияние максимального числа итераций на показатели ошибок представлены на рис. 2 для блока длиной 4000, (3,6) регулярного LDP-кода. Ограничение количества итераций (только 10) приводит к недопустимой производительности - практически никакие ошибки кадра не будут исправлены. С другой стороны, увеличение числа итераций более, чем 50 не дает значимой выгоды для выбранного режима. Поэтому будем ограничивать максимальное количество итераций на это значение на протяжении всей оценки.

Вынужденная конвергенция декодирования. Подход «вынужденной конвергенции» уменьшает сложность декодирования, используя тот факт, что большое количество переменных узлов сходится к сильному доверию после всего нескольких итераций, т.е. эти биты уже надежно декодированы и можно пропустить обновление их доверия в последующих итерациях. Пороговое пра-

вило используется для идентификации этих узлов. С этой целью определяем

$$B_i^a = \sum_{\forall j} Q_{i,j}^a, \quad B_i^a \leq N_v \quad (2)$$

как «доверие» переменного узла v_i , находящегося в состоянии a . N_v – число соседних проверочных узлов v_i . Обратите внимание, что $B_i^a = N_v - B_i^1$. Всякий раз, когда B_i^a превышает определенный порог t , то «отключаем» узел для следующих итераций, т.е. больше не обновляются сообщения, которые этот узел посылает в соседние узлы. На данный момент есть два различных варианта для отключения узла:

- можно просто взять текущие значения $Q_{i,j}^a$, и пусть они остаются фиксированы, пропуская последующие итерации;

- можно попытаться заставить процесс декодирования сходиться еще быстрее выбирая доверие в узлах в направлении 0 (или 1, соответственно). Это, очевидно, вводит искусственные шумы в процессе декодирования и, следовательно, можно ожидать, что приведет к повышению частоты появления ошибок.

Выбор t соответственным образом позволяет снизить вычислительную сложность для выполнения ошибок. Обращаем внимание, что для практической реализации можно хранить вектор, содержащий индексы активных переменных узлов, чтобы избежать проверки на каждом переменном узле, является ли он по-прежнему активным или нет при вычислении $Q_{i,j}^a$ при передаче сообщений.

Результаты моделирования. Оцениваем производительность алгоритма для (3,6) регулярного LDPC-кода (следовательно, $N_v = 3$ для всех переменных узлов) с размером блока 4000 битов, используя передачу BPSK (двоичная фазовая модуляция) по каналу с АБГШ. Для того, чтобы оценить сложность декодирования различных методов декодера, определяем относительную сложность фактор Θ_D как:

$$\Theta_D = \frac{1}{N_B} \sum_i N_{A,i} \Pr(N_i \geq i), \quad (3)$$

где N_B – число переменных узлов, $N_{A,i}$ – число активных узлов на шаге i итерации и $\Pr(N_i \geq i)$ – вероятность достижения шага итерации i . $\Theta_D = 1$ является, следовательно, сложностью одного шага итерации, где все переменные узлы активны и, очевидно, является функцией от SNR (англ. signal-to-noise ratio, отношение сигнал/шум).

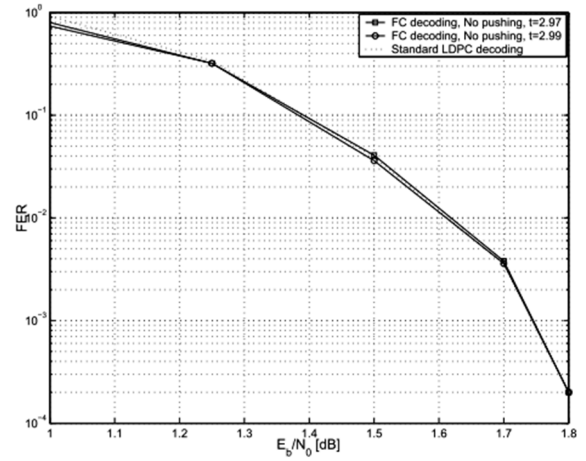


Рис. 3. Производительность кадра ошибки вынужденной конвергенции LDPC декодирования без «нажатия» доверия по сравнению со стандартным LDPC декодированием (пунктирная кривая)

На рис. 3 показана производительность кадра ошибки вынужденной конвергенции LDPC декодирования без «нажатия» доверия в зависимости от отношения сигнал/шум и выбранного порога t . Используется (3,6) регулярный LDPC код, размер блока 4000 бит и передача BPSK по каналу АБГШ. Производительность погрешности обоих алгоритмов одинакова. Видим, что до тех пор, пока не вносятся искусственные шумы путем нажатия доверия в узлах, производительность ошибки не ухудшается.

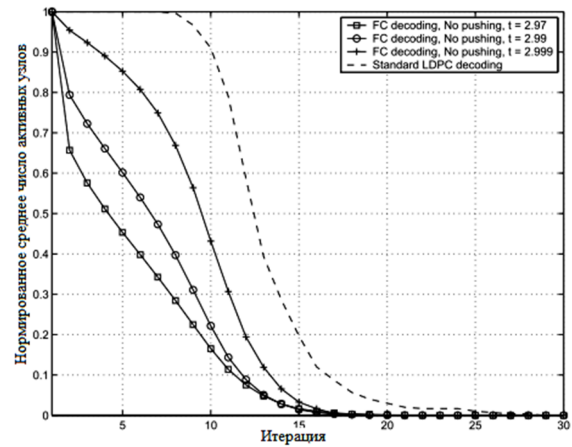


Рис. 4. Сложность вынужденной конвергенции LDPC декодирования без нажатия доверия по сравнению со стандартным LDPC декодированием (пунктирная кривая), с точки зрения среднего соотношения активных узлов в зависимости от количества итераций i

На рис. 4 показано, как сложность уменьшается с помощью вынужденной конвергенции в интересующем режиме при $\text{SNR} = 1,8$ дБ. Среднее количество активных узлов распадается очень быстро, как t уменьшается. Тем не менее кривые FC все сходятся на 15 итерациях, что является явным показателем того, что среднее число итераций не зависит от t .

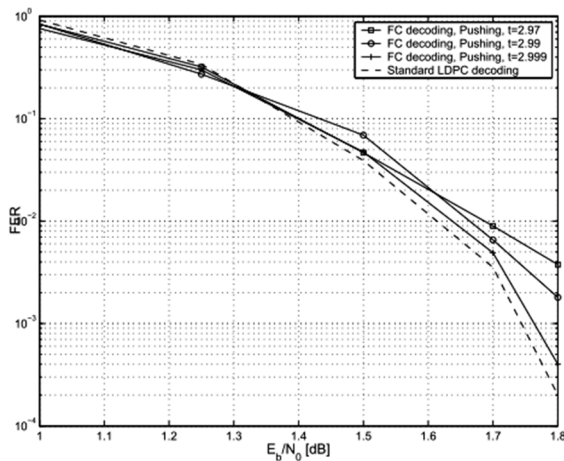


Рис. 5. Ошибка производительности вынужденной конвергенции LDPC-декодирования с использованием нажатия доверия, и стандартное LDPC-декодирование (пунктирная кривая) для длины блока 4000 бит (3,6) регулярного LDPC-кода, и передачи BPSK по каналу АБГШ

На рис. 5 показана ошибка производительности вынужденной конвергенции LDPC декодирования с использованием нажатия доверия. Для очень низких значений t , таких как $t = 2,9$, производительность становится неприемлемой, в то время как при $t = 2,999$, ухудшение производительности незначительно - потеря только 0.025 дБ относительно использования стандартного LDPC декодирования. Для промежуточных значений $t = 2,97$, $t = 2,99$ потери в производительности ошибок по-прежнему приемлемы на уровне 1,8 дБ, и сравнительно высокая частота ошибок кадров 10^{-2} . Тем не менее процент ошибок начинается на этом уровне, и можем ожидать значительные потери SNR для низких частот целевых ошибок.

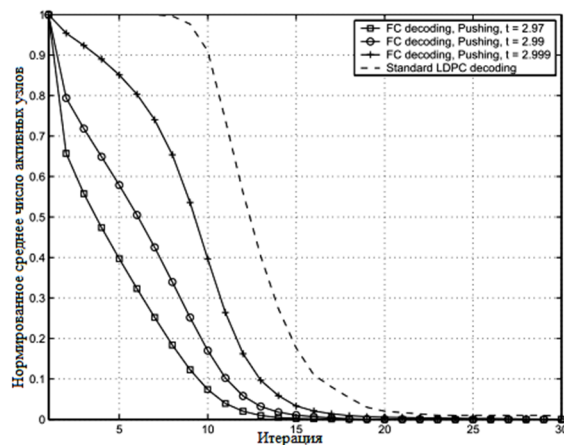


Рис. 6. Сложность вынужденной конвергенции LDPC-декодирования с использованием нажатия доверия по сравнению со стандартным LDPC-декодированием (пунктирная кривая), с точки зрения среднего соотношения активных узлов в зависимости от количества итераций i

Улучшение снижения сложности FC в сочетании с нажатием доверия в узлах показано на рис. 6 для SNR = 1,8 дБ. При больших значениях t результаты практически идентичны случаю без нажатия доверия. Тем не менее видим, что при $t = 2,97$

сложность для большого числа итераций уменьшается быстрее. Среднее число итераций немного снижается (от 11,5 до 10,9), эта тенденция, которая продолжается по мере понижения t (в среднем 9 итераций при $t = 2,9$). В настоящее время исследуем, как может быть дополнительно снижен порог без уменьшения возможности коррекции ошибок до неприемлемой степени. Число активных узлов распадается очень быстро, как t уменьшается. При малых значениях t , среднее число итераций декодера уменьшается.

Получив необходимые статистические данные по среднему количеству активных узлов, теперь можем перейти к вычислению средней сложности различных реализаций декодера, в интересующем режиме при SNR = 1,8 дБ. Определяя Θ_D , ожидаемое снижение сложности теперь можно легко вычислить:

Порог	$\Theta_{D,P}$	Снижение сложности	$\Theta_{D,NP}$	Снижение сложности
-	12.5	-	12.5	-
2.999	8.4	33 %	8.6	31 %
2.99	5.7	54 %	6.2	50 %
2.97	4.1	67 %	4.9	61 %

Здесь $\Theta_{D,P}$ обозначает среднюю сложность, когда допускаем нажатие доверия, в то время как $\Theta_{D,NP}$ является сложностью, когда только фиксируем доверие в узлах. Видим, что даже при сравнительно больших значениях t , сложность декодера может быть значительно снижена. В частности, можем добиться снижения сложности на 61%, сохраняя при этом первоначальную производительность ошибки, если выберем $t = 2,97$ и не используя нажатия доверия. Глядя на небольшие различия в снижении сложности между двумя представленными вариантами, а также с учетом ухудшения производительности при использовании нажатия доверия, необходимо рассмотреть вопрос об использовании только простой вынужденной конвергенции LDPC декодера, то есть, только отключив переменные узлы и сохраняя свои первоначальные значения для $Q_{i,j}^a$.

Заключение. Представлена новая архитектура LDPC декодера, придуман подход «принудительной конвергенции». Говоря о понятии, что большое число узлов сходится очень быстро в процессе передачи сообщений, используем пороговое правило для идентификации узлов, которые уже имеют сильную "уверенность" в их вероятности нахождения в состоянии 0 или 1. Эти узлы отключены, и их соответствующие сообщения больше не обновляются - что приводит к снижению сложности декодирования. Полученные результаты показывают, что принудительная конвергенция является мощным средством уменьшения вычислительной сложности LDPC декодирования.

Показано, что при соответствующем выборе порога, характеристики ошибок могут быть сохра-

нены и сложность будет снижена до 60% для блока длиной 4000, (3,6) регулярного LDP-кода, при SNR = 1,8 дБ. Кроме того, заставляя доверие деактивированных узлов 0 или 1, кажется, не будет жизнеспособным вариантом, так как вводится искусственный шум, таким образом, значительно снижает возможности коррекции ошибок декодера, и существенно дополнительное снижение сложности.

Литература

1. Gallager, R.G. (1962):Low density parity check codes,IRE Trans.Info.Theory, Vol. IT-8,pp.21-28.
2. Gallager, R.G. (1963):Low-Density Parity-Check codes,MIT press,Cambridge,MA.
3. Davey, M;Mackay, D. (1998):Low-density parity-check codes over GF(q),IEEE communication letter., vol.2, no.1, pp. 165-167,January.
4. Mackay, D.J;Neal, R. (1996):Near Shannon-Limit performance of low density parity-check codes,"vol. 32,pp. 1645-1646.
5. Башкиров, А.В. Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня [Текст] / А.В. Башкиров, Л.Н. Коротков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 1. - С. 65-69.
6. Башкиров, А.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11.- № 6. - С. 97-99.

Воронежский государственный технический университет

USE FORCED TO REDUCE THE CONVERGENCE COMPLEXITY LDPC DECODING

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kibr@vorstu.ru

M.V. Horoshaylova, postgraduate of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru

In this article, we show the architecture of the decoding on the basis of codes with low-density parity-check that utilizes threshold rule to decide whether the variable node LDPC decoder to update its information in subsequent iterations of the decoding process, or be regarded as convergent-superconductivity (convergence). It is shown that when choosing the threshold accordingly, decoding complexity can be significantly reduced with only a slight deterioration of correction performance oshi-side. There is introduced a method of "Forced convergence» (FC), to reduce the number of active sites per iteration, which in turn, reduces the overall complexity of decoding. A new architecture of LDPC decoder, coined approach "forced convergence". Talking about the concept that a large number of nodes converges very quickly during the transmission of messages using the threshold rule for the identification of sites that already have a strong "confidence" in their probability of being in state 0 or 1. These nodes are disabled and their corresponding messages are no longer updated - which reduces the complexity of decoding. The results show that the forced convergence is a powerful tool for reducing the computational complexity of LDPC decoding

Key words: high throughput, the LDPC decoder, low-complexity algorithm for message transmission

References

1. Gallager, R.G. (1962):Low density parity check codes,IRE Trans.Info.Theory, Vol. IT-8,pp.21-28.
2. Gallager, R.G. (1963):Low-Density Parity-Check codes, MIT press, Cambridge, MA.
3. Davey, M;Mackay, D. (1998):Low-density parity-check codes over GF(q),IEEE communication letter., vol.2, no.1, pp. 165-167,January.
4. Mackay, D.J;Neal, R. (1996):Near Shannon-Limit performance of low density parity-check codes,"vol. 32,pp. 1645-1646.
5. Bashkirov A. V. Model macshtabiruemogo LDPC – decoder nizkoy mochnosti s ispolzovaniem algoritmicheskogo sinteza vusokogo yrovnj [Model Low power LDPC-scalable decoder using the high-level algorithmic synthesis] Voronezh, VSTU 2016. 65-69 pp.
6. Bashkirov A. V. Realizachij LDPC – decoder na massivno-parallelnix vychislitel'nyx ystroystvax [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.

ВЕРИФИКАЦИЯ LDPC-КОДОВ

Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков, М.В. Хорошайлова, О.Н. Чирков

В данной статье проводится сравнительный анализ LDPC-кодов с такими кодами, как турбокоды, коды Рида-Соломона и т.п., предоставляются как преимущества, так и недостатки LDPC-кодов по сравнению с вышеперечисленными кодами. В качестве сравнительных данных приведены графики моделирования данных кодов. Также было произведено сравнительное моделирование LDPC-кодов и кодов Рида-Соломона. Конструкции данных кодов являются либо циклическими, либо квазициклическими, благодаря этой особенности можно производить не просто быстрое декодирование информации, но также ускорять кодирование данных. Установлено, что коды LDPC обладают плохими характеристиками при учёте скорости кодирования, это происходит из-за того, что коды Галлагера, имея отличную скорость кодирования, не могут быть свободными кодами с точки зрения данной скорости. Представленные результаты исследований относятся к наилучшим алгоритмам декодирования, которые работают с некантованными решениями демодулятора. Анализируются возможности использования LDPC-кодов в различных стандартах кодирования информации, таких как DVB – S2, DVB – T2 и IEEE 802.3an, а также рассматривается дальнейшее развитие LDPC-кодов, их перспективы использования в будущем в различных способах кодирования данных

Ключевые слова: LDPC-коды, турбокоды, коды Рида-Соломона, стандарты кодирования информации DVB – S2, DVB – T2 и IEEE 802.3an

Введение.* В настоящее время коды LDPC (которые также называют кодами МПП, то есть коды с малой плотностью проверок) занимают одну из важнейших ниш в телекоммуникационном кодировании наравне с турбокодами. Впервые предложенные Р. Галлагером ещё в 1963 году (отсюда второе название кодов – коды Галлагера) они не получили должного развития в своё время из-за сложной структуры составления кодеров и декодеров. Однако с развитием телекоммуникационных технологий возросла необходимость к снижению энергетических затрат на кодирование для повышения передаваемой информации. И в настоящее время коды МПП получили новый виток развития, т.к. обладают всеми необходимыми качествами, а также не защищены патентами, что даёт возможность к их свободному использованию.

Коды Галлагера обладают малым минимальным расстоянием, но зато имеют большую степень исправления ошибок при их небольшой сложности декодирования. Приведены доказательства того, что с ростом длины коды Галлагера приближаются к пропускной способности канала с аддитивным белым гауссовским шумом, и тем самым данные коды превосходят турбокоды по возможностям декодирования. Также следует отметить, что конструкции данных кодов являются либо

циклическими, либо квазициклическими, благодаря этой особенности можно производить не просто быстрое декодирование информации, но также ускорять кодирование данных. Кроме того, следует отметить тот факт, что для кодов Галлагера, которые не обладают свойствами цикличности, также существуют лёгкие способы кодирования.

Как уже отмечалось выше, прямым конкурентом МПП кодов являются турбокоды, и сравнивая их можно выразить как ряд преимуществ LDPC кодов, так и недостатков.

К преимуществам можно отнести:

1. Коды Галлагера имеют преимущество по скорости декодирования в сравнении с турбокодами.

2. Коды Галлагера показывают лучшие характеристики в каналах связи, в которых вероятность ошибки относительно мала.

Использование методов итеративного декодирования к LDPC-кодам позволяет вплотную подобраться к пропускной способности канала при малой сложности реализации. Поэтому во многих стандартах передачи данных коды МПП рекомендованы для исправления ошибок. В частности данные коды применяются в стандартах DVB – S2 (для спутникового телевидения), DVB – T2 (для цифрового наземного телевидения) и в стандарте IEEE 802.3an сети Ethernet 10G в ЕС.

Согласно результатам исследования кодов для включения в стандарты были аргументированы данные преимущества:

- отставание от границы Шеннона всего на 0,6–0,8 дБ;

- преимущество на 0,3 дБ по сравнению с лучшим из исследуемых турбокодов;

- преимущество на 2,5–3,0 дБ, то есть 30% прирост в мощности; [2]

Так, например, в стандарте DVB-T2 функции корректирующего кода выполняет каскадный код, а функции внешнего – блочный код Боуза-

Астахов Николай Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8 (473)243-77-06, e-mail: kopr@vorstu.ru
 Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kopr@vorstu.ru
 Костюков Александр Сергеевич – ВГТУ, студент, тел. 8 (473)243-77-06, e-mail: stalkerklon@mail.ru
 Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru
 Чирков Олег Николаевич – ВГТУ, ассистент, тел. 8 (473)243-77-06, e-mail: kopr@vorstu.ru

Чоудхури-Хоквингема (БЧХ), функции внутреннего кода выполняет МПП код. Следует отметить, что размер входного блока данных для БЧХ кодера зависит от скорости кодирования кода Галлагера и может иметь разную размерность, но размер кодового слова на выходе, после прохождения LDPC-кода всегда имеет размерность 64,8 тыс. бит.

Сравнения характеристик LDPC-кодов применяемых в стандартах DVB-S2, представлены на рис. 1. Как видно из графика, при такой кодовой скорости эффективность МПП кодов приближена к предельной.

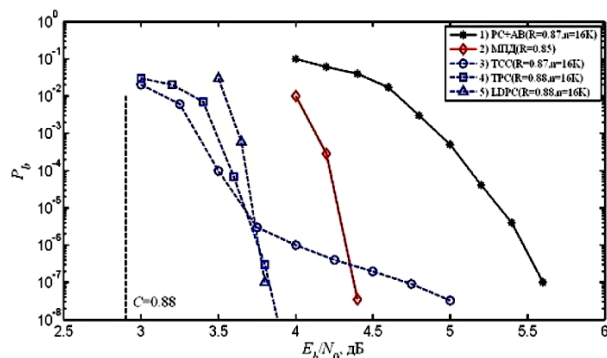


Рис. 1. Характеристики малоизбыточных помехоустойчивых кодов

На графике изображены:

1. PC+AB(R=0.87, n=16000) – характеристики каскадного кода, который состоит из кода Рида - Соломона и сверточного кода с общей скоростью R=0.87 и длиной блока в 16000 битов.
2. Многопороговые декодеры (МПД).
3. TCC (Turbo Convolutional Code).
4. TPC (Turbo Product Code) коды произведения.
5. LDPC-коды [1].

На рис. 2 кривой десять представлены характеристики очень большого кода Галлагера длиной в один миллион битов. На графике видно, что исследуемый код работает на частоте в 0,1 дБ от пропускной способности канала, но к сожалению его практическое применение невозможно из-за сложности реализации. Характеристики кодов Галлагера длиной 2304 и 64800 битов, которые используются в стандартах IEEE802.16e и DVB-S2, представлены на рис. 2 соответственно кривыми одиннадцать и двенадцать. Из графика видно, что исследуемые коды показывают отличные результаты, которые можно сравнить с результатами турбокодов, но при этом реализация кодов Галлагера сравнительно проще турбокодов.

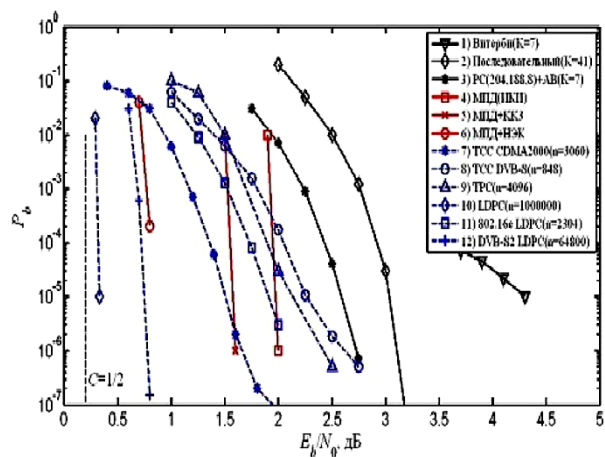


Рис. 2. Характеристики помехоустойчивых кодов

На графике изображены:

1. Декодер Витерби.
2. Последовательный декодер.
3. Код Рида-Соломона (PC).
4. Многопороговые декодеры (МПД).
5. МПД (ИКИ) характеристики сверточного кода с 40 итерациями декодирования декодера МПД.
6. МПД+ККЗ в данном случае МПД используется во внутреннем каскаде.
7. МПД+НЭК МПД алгоритмы каналов с неравномерной энергетикой.
8. TCC (Turbo Convolutional Code).
9. TPC (Turbo Product Code) коды произведения.
10. LDPC-коды [1].

Необходимо заметить, что представленные результаты исследований относятся к наилучшим алгоритмам декодирования, которые работают с неквантованными решениями демодулятора. Аппаратная реализация декодера, к сожалению невозможна, из-за различных ограничений аппаратуры. Если рассматривать простые алгоритмы, которые работают с квантованными на несколько уровней решениями демодулятора, то в таком случае происходят потери от 0,5 до 1 дБ. Результаты многопроходных декодеров и остальных алгоритмов получены с учётом требований к аппаратной реализации.

Также было произведено сравнительное моделирование LDPC-кодов и кодов Рида-Соломона (рис. 3). Результаты данного моделирования показали, что недвоичные коды Галлагера имеют лучшие характеристики, чем коды Рида-Соломона. Было выведено правило: чем больше размерность символа и длина кода LDPC, тем лучше эти характеристики.

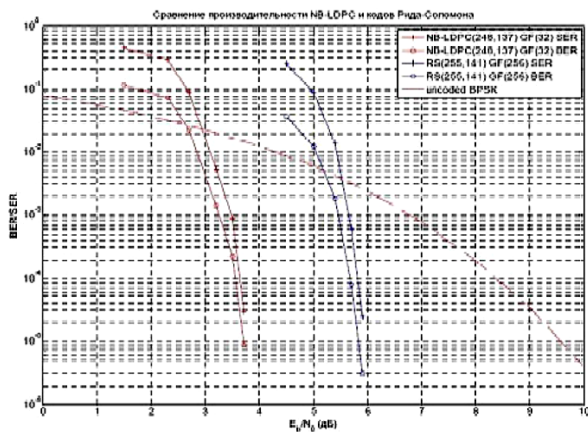


Рис. 3. Сравнение производительности LDPC кодов и кодов Рида-Соломона при средней длине блока

Как видно из представленных выше данных коды МПП позволяют существенно улучшить рабочие характеристики при высокой скорости передачи данных, а также являются предпочтительными из-за того, что они позволяют эффективно исправлять ошибки создаваемыми шумами, которые генерируются в канале передачи, повышая т.о. надёжность передачи данных. Однако коды LDPC обладают плохими характеристиками при учёте скорости кодирования, это происходит из-за того, что коды Галлагера, имея отличную скорость кодирования, не могут быть свободными кодами с точки зрения данной скорости. Также к недостаткам кодов LDPC можно отнести тот факт, что при использовании кодов затруднительно произвести кодирование информации в режиме реального времени, это вызвано чрезмерной сложностью кодирования LDPC кодов. Для того, чтобы обойти данный недостаток был разработан

специальный код повторного накопления, однако данный код имеет ограничение кодов МПП небольшой сложностью кодирования.

Из всего вышеизложенного можно подвести итог, коды LDPC являются одним из ведущих способов кодирования информации (сравнится с которыми и составить ему серьёзную конкуренцию могут только турбокоды), который имеет как свои преимущества, так недостатки. В настоящее время МПП коды активно развиваются, изучаются новые алгоритмы и способы кодирования, что даёт большие перспективы на будущее использование данных кодов в различных стандартах кодирования информации.

Литература

1. Gallager, R.G. (1962): Low density parity check codes, IRE Trans. Info. Theory, Vol. IT-8, pp. 21-28.
2. Gallager, R.G. (1963): Low-Density Parity-Check codes, MIT press, Cambridge, MA.
3. Davey, M.; Mackay, D. (1998): Low-density parity-check codes over GF(q), IEEE communication letter., vol. 2, no. 1, pp. 165-167, January.
4. Башкиров, А.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 6. - С. 97-99.
5. D. E. Hocevar, «A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes,» in IEEE Workshop Signal Process. 2004.
6. J. Huang, S. Zhou, and P. Willett, "Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication," IEEE J. Sel. Areas Commun., 2008.

Воронежский государственный технический университет

VERIFICATION LDPC OF CODES

N.V. Astahov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

A.S. Kostyukov, student of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: stalkerklon@mai.ru

M.V. Horoshaylova, graduate student of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

O.N. Chirkov, senior Lecturer of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

This article presents a comparative analysis of LDPC codes with codes such as the turbo codes, Reed-Solomon codes, etc., are provided both advantages and disadvantages compared to the LDPC codes over the listed codes. As comparative data shows simulation graphics data codes. As a comparative simulation was made LDPC codes and Reed-Solomon codes. Construction of these codes are either cyclic or quasi-cyclic, thanks to this feature you can not just make a quick decoding of information, but also to accelerate data encryption. Established that LDPC codes exhibit poor performance by taking into account a coding rate, this is due to the fact that Gallager codes, having distinct coding rate, can not be free from the standpoint of the codes given speed. The investigation results are best decoding algorithms that work with unquantized demodulator solutions. The possibility of using the LDPC codes in different standards of coding information, such as DVB - S2, DVB - T2

and IEEE 802.3an, and also considers the development of LDPC codes, their prospects for future use in a variety of ways to encode data

Key words: LDPC codes, a turbo codes, Reed Solomon codes, standards of coding of information of DVB – S2, DVB – T2 and IEEE 802.3an

References

1. Gallager, R.G. (1962): Low density parity check codes, IRE Trans. Info. Theory, Vol. IT-8, pp. 21-28.
2. Gallager, R.G. (1963): Low-Density Parity-Check codes, MIT press, Cambridge, MA.
3. Davey, M; Mackay, D. (1998): Low-density parity-check codes over $GF(q)$, IEEE communication letter., vol. 2, no. 1, pp. 165-167, January.
4. Bashkurov A. V. Realizatsiya LDPC – decoder na massivno-parallelnix vychislitel'nykh ustroystvakh [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.
5. D. E. Hocevar, A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes,» in IEEE Workshop Signal Process. 2004.
6. J. Huang, S. Zhou, and P. Willett, Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication, IEEE J. Sel. Areas Commun., 2008.

ОТРИЦАНИЕ МАЖОРИТАРНОГО МУЛЬТИПЛЕКСОРА

С.Ф. Тюрин

Создание отказоустойчивых, сбоеустойчивых бортовых цифровых вычислительных комплексов является одной из актуальных задач, особенно в свете последних тенденций импортозамещения в области электронной компонентной базы. Одним из основных путей повышения надёжности в этой области было и остаётся структурное резервирование. Используется троирование каналов аппаратуры с побитным выбором по большинству голосов (например, «два из трех», «три из пяти» и т.д.). Этот выбор выполняется мажоритарным устройством («мажоритаром») так, что если имеется сбой или даже отказ в одном из каналов, то на выходе «мажоритара» будет правильная информация. При этом используют мажоритарные мультиплексоры, позволяющие не только выполнять выбор по большинству голосов, но и проверять работу каждого отдельного канала. В статье строится КМОП-схема такого устройства путём анализа инверсии исходной таблицы истинности

Ключевые слова: сбоеустойчивость, мажоритарный мультиплексор, отрицание

Сбоеустойчивые бортовые системы управления космических аппаратов с момента своего зарождения в 50-е годы XX века не теряют своей актуальности [1], скорее, наоборот, в связи с увеличением степени интеграции микросхем и уменьшением технологических норм, несмотря на повышение качества и «выхода годных», снижение интенсивности отказов, интенсивность сбоев на несколько порядков может её превышать. Особенно возрастает вероятность сбоев в условиях воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ). Для создания отказоустойчивых (и сбоеустойчивых) систем используют резервирование [1,2], например, троирование каналов бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) с побитным устройством голосования по большинству голосов, называемым мажоритарным устройством («мажоритаром»), так, что если имеется сбой или даже отказ в одном из каналов, то на выходе «мажоритара» будет правильная информация.

Для парирования отказа в мажоритаре они также троироваются. Кроме того, каждый канал запитывается от своего источника питания, что позволяет избежать неправильной работы при снятии питания с одного из каналов. Но тогда уже не гарантируется исправление ошибки в оставшихся каналах. С целью повышения вероятности безотказной (бессбойной) работы аппаратуры увеличивают глубину мажоритирования, применяют так называемое «глубокое» мажоритирование. При этом используется так называемый мажоритарный мультиплексор, обеспечивающий «развал»

БЦВК на отдельные каналы а, b, с по сигналам управления x_1 , x_2 в процессе проведения проверок технического состояния. Условное графическое обозначение мажоритарного мультиплексора изображено на рис.1.

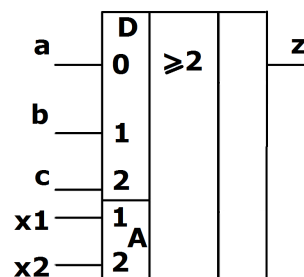


Рис. 1. Мажоритарный мультиплексор

Таким образом, в процессе тестирования БЦВК на выход z всех мажоритаров обеспечивается подача всех каналов а при $x_1=0$, $x_2=0$; всех каналов b при $x_1=1$, $x_2=0$; всех каналов с при $x_1=0$, $x_2=1$; при $x_1=1$, $x_2=1$ обеспечивается вычисление мажоритарной функции, то есть реализуется выражение:

$$z(x_2, x_1, abc) = a \cdot \overset{0}{x_2} \cdot \overset{0}{x_1} \vee b \cdot \overset{0}{x_2} \cdot \overset{1}{x_1} \vee c \cdot \overset{1}{x_2} \cdot \overset{0}{x_1} \vee (ab \vee ac \vee bc) \cdot \overset{1}{x_2} \cdot \overset{1}{x_1} \quad (1)$$

Таблица истинности мажоритарного мультиплексора имеет следующий вид (табл. 1).

Таблица 1
Функционирование мажоритарного мультиплексора

x_2	x_1	а	в	с
0	0	1	-	-
0	1	-	1	-
1	0	-	-	1
1	1	1	1	-
1	1	1	-	1
1	1	-	1	1

Реализация мажоритарной функции (функции переноса одноразрядного полного сумматора)

$$ab \vee ac \vee bc \quad (2)$$

в виде КМОП элемента приведена в [3]. С целью реализации (1) в базисе отказа и сбоеустойчивых элементов [2,4-5] необходимы операции инверсии таблиц истинности, в том числе вида табл. 1. Кроме того, вызывает интерес реализация (1) в виде отдельного элемента, отсутствующего в библиотеке элементов [3], что тоже требует получения выражения, инверсного (1). Всё это требует анализа таблицы, инверсной табл. 1. Рассмотрим вначале таблицу с ортогональными строками, например, табл. 2.

Таблица 2

ДНФ с ортогональными строками

a	b	c	d	x2	x1
1	-	-	-	0	0
-	1	-	-	0	1
-	-	1	-	1	0
-	-	-	1	1	1

Известно [2], что отрицание такой таблицы с ортогональными строками выполняется путём отрицания диагонали и позволяет получить табл. 3.

Таблица 3

Инверсия табл. 2

a	b	c	d	x2	x1
0	-	-	-	0	0
-	0	-	-	0	1
-	-	0	-	1	0
-	-	-	0	1	1

Действительно, преобразуем ДНФ, записанную в табл.3:

$$z = \bar{x}_2(\bar{a}\bar{x}_1 \vee \bar{b}\bar{x}_1) \vee x_2(\bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{d}\bar{x}_1). \quad (3)$$

Очевидно, что, отрицанием этой функции будет выражение, в котором отрицаются ДНФ в скобках по правилу, доказанному в [2], а они, соответственно, также отрицаются:

$$z = \bar{x}_2(\bar{a}\bar{x}_1 \vee \bar{b}\bar{x}_1) \vee x_2(\bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{d}\bar{x}_1). \quad (4)$$

Легко видеть, что получаем выражение:

$$\bar{z} = \bar{a}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{d}\bar{x}_2\bar{x}_1. \quad (5)$$

Следовательно, «отрицание мультиплексора» - это мультиплексор, у которого отрицаются входы данных a, b, c, d. Таким образом, отрицание табл. 2 приведёт к табл. 3. По аналогии можно предположить, что, поскольку функция (2) является

самодвойственной и отношение ортогональности при отрицании сохраняется, то, отрицая табл. 1, получим табл. 4.

Таблица 4

Функционирование инверсного мажоритарного мультиплексора

x2	x1	a	b	c
0	0	0	-	-
0	1	-	0	-
1	0	-	-	0
1	1	0	0	-
1	1	0	-	0
1	1	-	0	0

Проверим наше предположение:

$$\begin{aligned} z(x_2, x_1, abc) &= \bar{a}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee (ab \vee ac \vee bc)x_2x_1 = \\ &= \bar{a}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot (ab \vee ac \vee bc)x_2x_1 = \\ &= \bar{a}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot [(ab \vee ac \vee bc) \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1]. \end{aligned} \quad (6)$$

В силу самодвойственности мажоритарной функции получим:

$$\begin{aligned} &\bar{a}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \cdot \\ &[(\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{c} \vee \bar{b}\bar{c}) \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1] = \\ &= (\bar{a} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{b} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{c} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1) \\ &[(\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{c} \vee \bar{b}\bar{c}) \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1]. \end{aligned} \quad (7)$$

Применим закон дистрибутивности по x2 в первых двух скобках и по не x2 в третьей и четвёртой:

$$\begin{aligned} &(\bar{a} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{b} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{c} \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1) \\ &[(\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{c} \vee \bar{b}\bar{c}) \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1] = \\ &= [(\bar{a} \vee \bar{x}_1)(\bar{b} \vee \bar{x}_1) \vee \bar{x}_2] \{(\bar{c} \vee \bar{x}_1) \\ &[(\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{c} \vee \bar{b}\bar{c}) \vee \bar{x}_1] \vee \bar{x}_2\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим $(\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{c} \vee \bar{b}\bar{c}) = \bar{d}$ (9), тогда

$$[(\bar{a} \vee \bar{x}_1)(\bar{b} \vee \bar{x}_1) \vee \bar{x}_2] \{(\bar{c} \vee \bar{x}_1)[(\bar{d} \vee \bar{x}_1) \vee \bar{x}_2]\}. \quad (9)$$

Преобразуем выражения внутри квадратных и фигурных скобок:

$$\begin{aligned} &[\bar{a}\bar{b} \vee \bar{a}\bar{x}_1 \vee \bar{x}_1\bar{b} \vee \bar{x}_1\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2] \\ &\{\bar{c}\bar{d} \vee \bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{x}_1\bar{d} \vee \bar{x}_1\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя закон противоречия и обобщённого склеивания, упростим выражения в скобках:

$$[\bar{a}\bar{x}_1 \vee \bar{x}_1\bar{b} \vee \bar{x}_2] \{\bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{x}_1\bar{d} \vee \bar{x}_2\}. \quad (11)$$

Раскрываем скобки:

$$\begin{aligned} &(\bar{a}\bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{a}\bar{x}_1\bar{x}_1\bar{d} \vee \bar{a}\bar{x}_1\bar{x}_2) \vee \\ &\vee (\bar{x}_1\bar{b}\bar{c}\bar{x}_1 \vee \bar{x}_1\bar{b}\bar{x}_1\bar{d} \vee \bar{b}\bar{x}_2\bar{x}_1) \vee \\ &\vee \bar{c}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{d}\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2\bar{x}_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Легко видеть, что, применяя закон противоречия, получим:

$$\overline{a}x_1 \vee \overline{a}x_1\overline{x}_2 \vee \overline{b}dx_1 \vee \overline{b}x_2x_1 \vee \overline{c}x_2\overline{x}_1 \vee \overline{d}x_2x_1. \quad (13)$$

Заметим, что

$$\overline{a}x_1 = (\overline{a}x_1)(\overline{c}x_1), \quad \overline{b}dx_1 = (\overline{b}x_1)(\overline{d}x_1), \quad (14)$$

то есть налицо опять закон обобщённого склеивания по x_2 :

$$\overline{a}x_1 \vee (\overline{a}x_1)\overline{x}_2 \vee \overline{b}dx_1 \vee (\overline{b}x_1)\overline{x}_2 \vee (\overline{c}x_1)x_2 \vee (\overline{d}x_1)x_2. \quad (15)$$

Окончательно получаем:

$$\overline{a}x_1\overline{x}_2 \vee \overline{b}x_2x_1 \vee \overline{c}x_2\overline{x}_1 \vee \overline{d}x_2x_1. \quad (16)$$

Возвращаясь к (9), получим итог:

$$\overline{a}x_1\overline{x}_2 \vee \overline{b}x_2x_1 \vee \overline{c}x_2\overline{x}_1 \vee (\overline{a}\overline{b} \vee \overline{a}\overline{c} \vee \overline{b}\overline{c})x_2x_1. \quad (17)$$

Это и требовалось доказать. Предложим векторное доказательство. Рассмотрим множество взаимно ортогональных векторов переменных x :

$$\vec{X} = \{\vec{X}_0, \vec{X}_1, \vec{X}_2, \vec{X}_3\}. \quad (18)$$

Представим функцию (1) таким образом:

$$\overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1 \vee \overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3, \text{ где} \quad (19)$$

$$d = ab \vee ac \vee bc.$$

Выполним отрицание:

$$\begin{aligned} \overline{\overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1 \vee \overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3} &= \\ &= (\overline{a} \vee \vec{X}_0)(\overline{b} \vee \vec{X}_1)(\overline{c} \vee \vec{X}_2)(\overline{d} \vee \vec{X}_3). \end{aligned} \quad (20)$$

Но что такое, например, $\vec{X}_0$?

$$\begin{aligned} \vec{X}_0 &= \overline{x_2x_1} = x_2 \vee x_1 = \\ &= x_2(x_1 \vee \overline{x}_1) \vee x_1(x_2 \vee \overline{x}_2) = \\ &= \overline{x}_2x_1 \vee x_2\overline{x}_1 \vee x_2x_1 = \vec{X}_1 \vee \vec{X}_2 \vee \vec{X}_3. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, отрицание одного вектора - это дизъюнкция остальных (и это пример операции многозначной логики, одно из отрицаний Поста):

$$\begin{aligned} (\overline{a} \vee \vec{X}_1 \vee \vec{X}_2 \vee \vec{X}_3)(\overline{b} \vee \vec{X}_0 \vee \vec{X}_2 \vee \vec{X}_3) \\ (\overline{c} \vee \vec{X}_0 \vee \vec{X}_1 \vee \vec{X}_3)(\overline{d} \vee \vec{X}_0 \vee \vec{X}_1 \vee \vec{X}_2). \end{aligned} \quad (22)$$

Применим закон дистрибутивности:

$$\begin{aligned} [(\overline{a} \vee \vec{X}_1)(\overline{b} \vee \vec{X}_0) \vee (\vec{X}_2 \vee \vec{X}_3)] \\ [(\overline{c} \vee \vec{X}_3)(\overline{d} \vee \vec{X}_2) \vee (\vec{X}_0 \vee \vec{X}_1)]. \end{aligned} \quad (23)$$

Далее:

$$\begin{aligned} [(\overline{a}\overline{b} \vee \overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1 \vee \vec{X}_0\vec{X}_1) \vee (\vec{X}_2 \vee \vec{X}_3)] \\ [(\overline{c}\overline{d} \vee \overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3 \vee \vec{X}_2\vec{X}_3) \vee (\vec{X}_0 \vee \vec{X}_1)]. \end{aligned} \quad (24)$$

Поскольку все вектора ортогональны, то конъюнкция разных векторов равна нулю, а

также применяя закон обобщённого склеивания, который и здесь выполняется, получим:

$$\begin{aligned} [(\overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1) \vee (\vec{X}_2 \vee \vec{X}_3)] \\ [(\overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3) \vee (\vec{X}_0 \vee \vec{X}_1)]. \end{aligned} \quad (25)$$

Каждый член первой квадратной скобки при умножении на вторую будет отличен от нуля тогда и только тогда, когда номера векторов совпадут (ибо тогда они не ортогональны):

$$\overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1 \vee \overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3. \quad (26)$$

Таким образом, окончательно получим:

$$\overline{a}\vec{X}_0 \vee \overline{b}\vec{X}_1 \vee \overline{c}\vec{X}_2 \vee \overline{d}\vec{X}_3. \quad (27)$$

То есть

$$\begin{aligned} \overline{z}(x_2x_1abc) &= \overline{a}\overline{x}_2\overline{x}_1 \vee \overline{b}x_2x_1 \vee \overline{c}x_2\overline{x}_1 \vee \\ &\vee (\overline{a}\overline{b} \vee \overline{a}\overline{c} \vee \overline{b}\overline{c})x_2x_1. \end{aligned} \quad (28)$$

Выражение (28) эквивалентно выражению (17). Преобразуя (28) в скобочную форму, получим:

$$\begin{aligned} \overline{z}(x_2x_1abc) &= (\overline{a}\overline{x}_1 \vee \overline{b}x_1)\overline{x}_2 \vee \{\overline{c}x_1 \vee \\ &\vee [(\overline{a}\overline{b} \vee \overline{a}\overline{c} \vee \overline{b}\overline{c})x_1]x_2\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Аналогично преобразуя (1), получим:

$$\begin{aligned} z(x_2x_1abc) &= (\overline{a}x_1 \vee \overline{b}x_1)x_2 \vee \{\overline{c}x_1 \vee \\ &\vee [(\overline{a}\overline{b} \vee \overline{a}\overline{c} \vee \overline{b}\overline{c})x_1]x_2\}. \end{aligned} \quad (30)$$

Отрицание функции мажоритарного мультиплексора (28) и выражения (29), (30) по существу представляют бинарные деревья решений и позволяют получить соответствующую реализацию схемы в виде КМОП схемы. На рис. 2 показана упрощённая схема, где транзисторы обозначены соответствующими переменными.

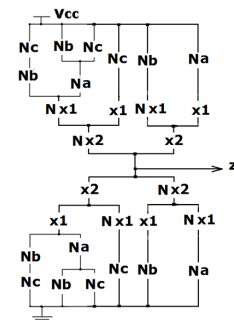


Рис. 2. Схема упрощённая КМОП реализации мажоритарного мультиплексора

Символом N на рис. 2 обозначено отрицание соответствующей переменной выражения (1), предполагается, что имеются парафазные переменные, то есть и сами переменные, и их отрицания. Верхняя часть схемы рис. 1 описывает условия равенства (30)

единице, поскольку транзисторы р-проводимости открываются нулями. Нижняя часть описывает условия равенства (29) единице, поскольку нижние транзисторы n-проводимости открываются единицами. Проверим формирование логической единицы на наборе 00 по рис. 3.

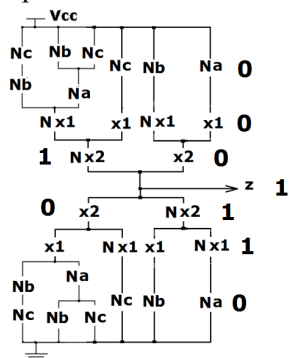


Рис. 3. Проверка функционирования мажоритарного мультиплексора на наборе 00

Видим, что при $a=1$, то есть при $Na=0$ на выходе будет 1. В случае, если $a=0$, то есть при $Na=1$, на выход будет выдан 0. На наборе 01 будет активирована вторая ветвь схемы рис. 2. В случае, если $b=1$, то есть при $Nb=0$, на выход будет выдана 1. В случае, если $b=0$, то есть при $Nb=1$, на выход будет выдан 0. Аналогично можно убедиться в работоспособности остальных ветвей схемы.

При реализации самосинхронной схемы [3], имеющей основной и двойственный каналы, получим схему рис. 4.

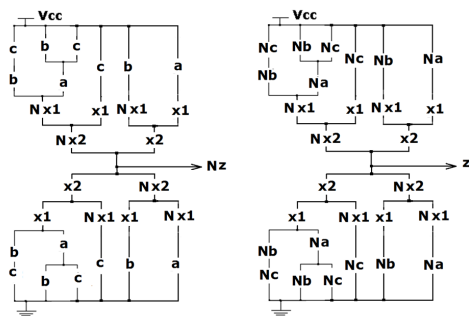


Рис. 4. Схема упрощённая КМОП реализации мажоритарного мультиплексора для самосинхронных схем

Проверим формирование логической единицы по выходу Nz на наборе 00 по рис.4. Видим, что при $a=0$, то есть при $Na=1$ на выходе Nz будет 1, а на выходе z будет 0 – рис. 5. Аналогично можно убедиться в функционировании предлагаемого мажоритарного мультиплексора для самосинхронных схем, изображённого на рис. 5 на остальных наборах.

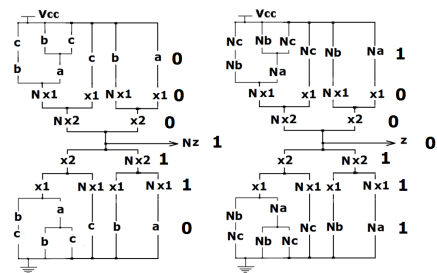


Рис. 5. Проверка функционирования мажоритарного мультиплексора для самосинхронных схем на наборе 00

Выполним проверку функционирования схемы в системе схемотехнического моделирования NI Multisim 10 фирмы National Instruments Electronics Workbench Group в два этапа в связи с ограничением модели на количество транзисторов. Вначале проверим мультиплексирование переменных a, b, c, d . Моделирование передачи переменной d на наборе 11 представлено на рис. 6,7:

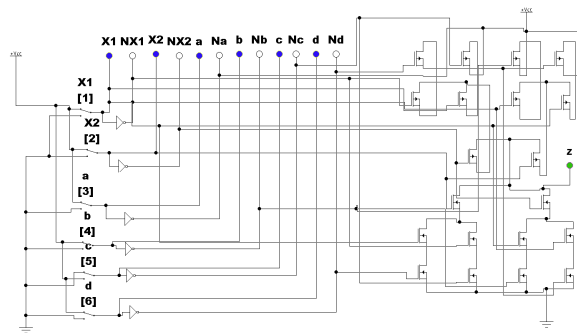


Рис. 6. Проверка функционирования мультиплексора для на наборе 11, $d=1$

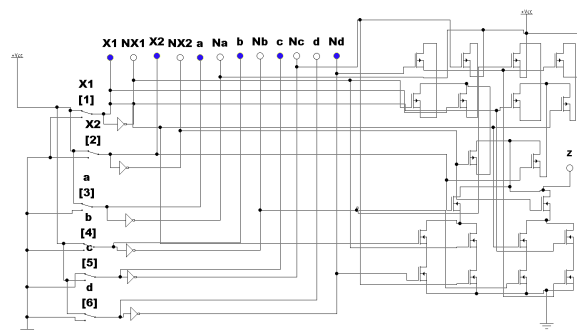


Рис. 7. Проверка функционирования мультиплексора для схем на наборе 11, $d=0$

Аналогично вышеописанному проверяется мультиплексирование остальных данных и для подсхемы Nz . На втором этапе выполним моделирование подсхемы мажоритарного элемента, который на первом этапе моделировался переменной d . Результаты

моделирования на наборе 001 изображены на рис.8.

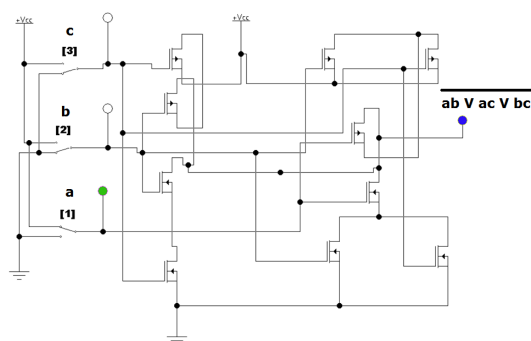


Рис. 8. Проверка функционирования мажоритарного элемента на наборе 001

Аналогично проверяется функционирование мажоритарного элемента на остальных наборах.

ВЫВОДЫ

Таким образом, отрицание таблицы истинности логической функции мажоритарного мультиплексора представляет собой локальные (построчные) отрицания исходной таблицы, причём, поскольку мажоритарная функция является самодвойственной, то в исходной таблице необходимо проинверсировать все значащие разряды, кроме кодов строк. Отрицание ортогональных таблиц целесообразно выполнять в предложенной векторной форме. Полученное после отрицания выражение описывает структуру подсхемы подключения шины «Ноль вольт» КМОП реализации мажоритарного мультиплексора. Причём, смена подсхем (инверсия, «переворот» КМОП

схемы) позволяет получить двойственную реализацию, необходимую в самосинхронной схемотехнике. Результаты моделирования схемы системе схемотехнического моделирования NI Multisim 10 фирмы National Instruments Electronics Workbench Group подтверждают правильность теоретических предположений на основе применения законов алгебры логики Буля.

Литература

1. Чекмарёв, С.А. Способ и система инъекции ошибок для тестирования сбоеустойчивых процессоров бортовых систем космических аппаратов [Текст] / С.А. Чекмарёв // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. [Электронный ресурс] Выпуск № 4 (56) / 2014. – Режим доступа URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sposob-i-sistema-inektzii-oshibok-dlya-testirovaniya-sboeustoychivyh-protsessorov-bortovyh-sistem-kosmicheskikh-apparatov> (дата обращения: 16.12.2015).
2. Tyurin S.F. Retention of functional completeness of Boolean functions under “failures” of the arguments [Text] / S.F. Tyurin // Automation and Remote Control. – 1999. - Vol. 60. - № 9. Part 2. -P. 1360-1366.
3. Библиотека элементов для проектирования самосинхронных полужазных микросхем серий 5503/5507 и 5508/5509 [Текст] / Ю.А. Степченко, А.Н. Денисов, Ю.Г. Дьяченко, Ф.И. Гринфельд, О.П. Филимонов, Н.В. Морозов, Д.Ю. Степченко. - М.: ИПИ РАН, 2008. - 296 с.
4. Kamenskikh, A.N. Advanced Approach to Development of Energy-Aware and Naturally Reliable Computing Systems [Text] / A.N. Kamenskikh, S.F. Tyurin // Proceeding of the 2015 IEEE North West Russia Section Young researches in electrical and electronic engineering conference (2015 ElConRusNW). pp67-69.
5. Kamenskikh, A.N. Features that provide fault tolerance of self-synchronizing circuits [Text] / A.N. Kamenskikh, S.F. Tyurin // Russian Electrical Engineering. – 2015. pp.672-682.
6. Ульман, Дж. Д. Вычислительные аспекты СБИС [Текст] / Дж.Д. Ульман; пер. с англ. А.В. Неймана; под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Радио и связь, 1990. – 480 с.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

INVERSION OF THE MAJORITY MULTIPLEXER

S.F. Tyurin, Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University, Russia, 614990, Perm, Komsomolsky Av., 29, e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

Creating a fault-tolerant onboard digital computer systems is one of the urgent tasks, particularly in the light of recent developments in the field of import of electronic components. One of the main ways to increase the reliability in this area was and still is the structural redundancy. Used triple redundancy with a choice of channels by a majority vote (for example, "two of three", "three out of five," etc.). Using the majority multiplexers allows not only to carry out the choice by a majority vote, but also to check the performance of each individual channel. In the paper, CMOS Majority Multiplexer circuit is constructed by analyzing the inversion of the truth table

Key words: Fault-Tolerant Digital Computer, Majority Multiplexer, Inversion

References

1. Chekmarev S.A. Sposob i sistema in"ekcii oshibok dlya te-stirovaniya sboeustojchivyyh processorov bortovyh sistem kosmicheskikh apparatov (Method and system for testing the error injection failures resistant processor board system of spacecrafts). Vestnik SibGAU. 2014, Vol. 56, No. 4 (in Russian). Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/sposob-i-sistema-inektsii-oshibok-dlya-testirovaniya-sboeustoychevyh-protssessorov-bortovyh-sistem-kosmicheskikh-apparatov> (accessed 16.12.2015).
2. Tyurin S.F. Retention of functional completeness of Boolean functions under “failures” of the arguments. Automation and Remote Control. – 1999. Vol.60. No 9 part 2. pp. 1360-1366.
3. Stepchenkov Yu.A., Denisov A.N., Diachenko Yu.G., Grinfeld F.I., Filimonenko O.P., Morozov N.V., Stepchenkov D.Yu. Biblioteka elementov dlya proyektirovaniya samosinkhronnykh poluzkaznykh mikroskhem seriy 5503/5507 i 5508/5509 [Library elements for designing self-timed chip semi-custom series 5503/5507 and 5508/5509] — M.: IPI RAN. 2008. — p. 296.
4. Kamenskikh A.N., Tyurin S.F. Advanced Approach to Development of Energy-Aware and Naturally Reliable Computing Systems. Proceeding of the 2015 IEEE North West Russia Section Young researches in electrical and electronic engineering conference (2015 ElConRusNW). pp67-69.
5. Kamenskikh, A.N., Tyurin, S.F. Features that provide fault tolerance of self-synchronizing circuits // Russian Electrical Engineering. – 2015. pp.672-682.
6. Ul'man Dzh. D. Vychislitel'nye aspekty SBIS [Computational Aspects of VLSI] Per. s angl.: A.V. Nejmana: pod red. P.P. Parhomenko. – M.: Radio i svyaz', 1990. – p.480.

АНАЛИЗ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С УЧЕТОМ КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И ВЛИЯНИЯ НОСИТЕЛЯ

Л.А. Носова, Ю.Г. Пастернак, А.С. Самодуров

Для различных целей могут применяться антенные решетки, построенные по разным геометрическим принципам и состоящие из разных элементов. В данной работе проанализированы диаграммы направленности пеленгационной антенной решетки, состоящей из трех и девяти вертикальных полуволновых вибраторов. Диаграммы направленности представляют собой взаимокорреляционные функции идеального и реального пеленгов. Приведены формулы для расчета этих функций. Антенная решетка расположена на борту беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера). Это предопределяет влияние носителя на характеристики решетки, в частности на диаграмму направленности. Проведенное численное моделирование показывает сильную зависимость ее формы от числа элементов антенной решетки и особенно сильного влияния аппарата-носителя на высоких частотах рабочего диапазона при специфических углах прихода электромагнитной волны. Для трехэлементной решетки выявлены большие уровни заднего и боковых лепестков на всех анализируемых частотах, кроме самой низкой 450 МГц. Влияние носителя наиболее заметно на самой высокой частоте 1800 МГц при угле прихода волны 90°

Ключевые слова: диаграмма направленности, антенная решетка, квадрокоптер

Кольцевые антенные решетки могут применяться для целей радиоразведки, радиомониторинга, радиопеленгации, радиопротиводействия, местоопределения, различных видов РЭБ и РЭП [1, 2]. Они могут быть составлены из различных типов вибраторных, биконических, гантелеобразных, щелевых антенн и даже рупорных излучателей [3, 4].

В зависимости от преследуемых целей, диапазонов частот и используемых методов пеленгации могут применяться как стационарные, так и мобильные кольцевые антенные решетки размещенные на каком-либо носителе [5, 6]. Носителем может являться, в том числе наземное или воздушное транспортное средство: различного вида автомобили, бронемашины, самолеты, вертолеты и даже беспилотные летательные аппараты [7] (БЛА) – рис. 1.

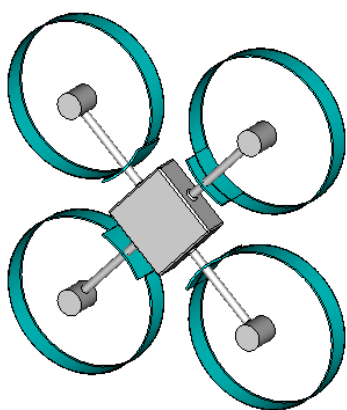


Рис. 1. Внешний вид носителя

Носова Лилия Андреевна – ВГТУ, магистрант, e-mail: liy1994@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: pasternakug@mail.ru

Самодуров Александр Сергеевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: unaxel2000@mail.ru

Предлагается проанализировать диаграммы направленности пеленгационной антенной решетки, состоящей из трех и девяти вертикальных полуволновых вибраторов. Возможно применение различных методик расчета [8, 9], но в данном случае анализируемые диаграммы направленности являются на самом деле взаимокорреляционными функциями [10, 11], полученными с учетом «идеальных» фаз источников сигналов рассчитанных в программе MathCAD и «реальных» углов прихода электромагнитной волны по следующей формуле:

$$DN(\varphi) = \sum_{n=1}^N \exp(i \cdot \psi_n) \cdot \exp(-i \cdot k_0 \cdot (x_n \cdot \cos(\varphi) + y_n \cdot \sin(\varphi) - R)),$$

$$\text{где } k_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0},$$

$$x_n = R \cdot \cos\left(\frac{(n-1) \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right),$$

$$y_n = R \cdot \sin\left(\frac{(n-1) \cdot 2 \cdot \pi}{N}\right),$$

DN - функция направленности АР;

φ - азимутальный угол, рад.;

λ_0 - длина волны в свободном пространстве, м;

ψ_n - фаза тока в n -м вибраторе, рад.;

x_n, y_n - координаты n -го вибратора АР, м;

R - радиус АР, м;

N - число элементов АР.

Диаграммы направленности для наиболее характерных углов и частот приведены на рисунках 2 – 16. Сплошной линией нанесены диаграммы для трехэлементной решетки, пунктиром для девятиэлементной.

На рис. 2 для частоты 450 МГц и угла прихода волны 30° никаких особых отличий трехэлементной решетки от девятиэлементной не видно, диаграммы направленности практически совпадают, лишь

несколько большую величину имеет «задний лепесток» трехэлементной антенны, но уровень заднего излучения не столь значителен, как и разница в уровнях излучения между двумя конструкциями.

Из рис. 3 следует что для частоты 900 МГц и того же самого угла прихода волны 30° влияния носителя на диаграммы направленности не заметно, лишь для трехэлементной решетки можно отметить значительный рост и раздваивание заднего лепестка, в целом диаграммы симметричны.

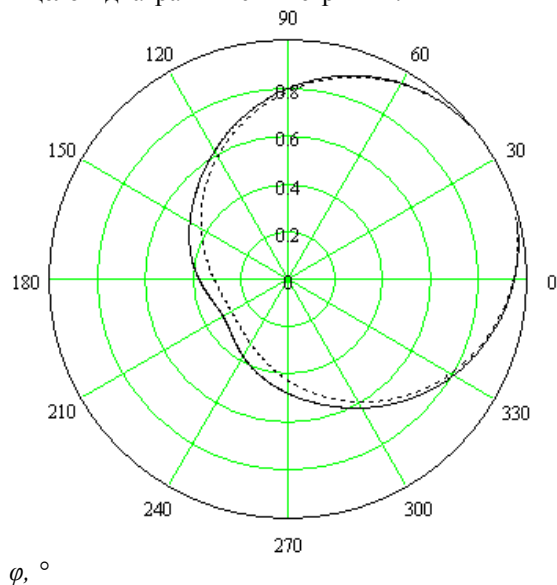


Рис. 2. Диаграммы направленности для угла прихода волны 30° и частоты 450 МГц

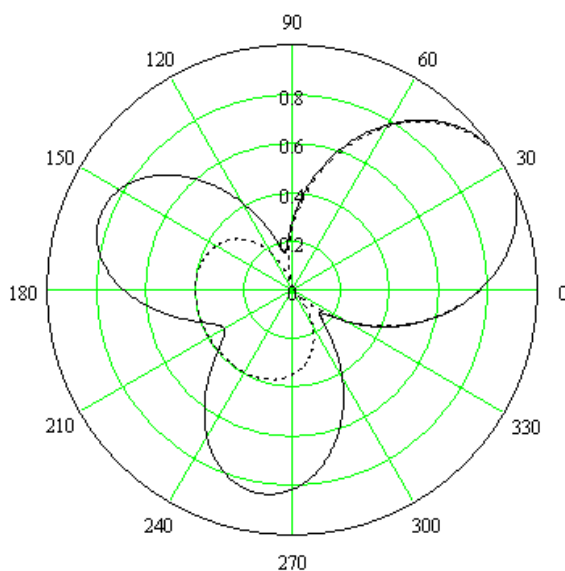


Рис. 3. Диаграммы направленности для угла прихода волны 30° и частоты 900 МГц

Несимметричность диаграмм направленности, вызванная по всей видимости влиянием носителя проявляется только на следующей анализируемой частоте 1800 МГц (рис. 4), кроме того значительно возрастает уровень заднего лепестка для трехэлементной решетки, практически достигая уровня главного.

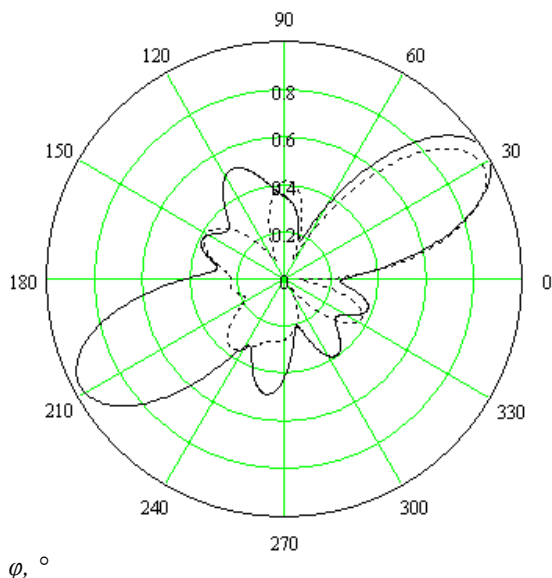


Рис. 4. Диаграмма направленности для угла прихода волны 30° и частоты 1800 МГц

На рис. 5 приведены диаграммы направленности для частоты 450 МГц и угла прихода волны 60° . Как и для угла 30° , влияния носителя в данном случае не заметно, уровень заднего излучения еще меньше, а для девятиэлементной решетки диаграмма направленности принимает вид кардиоиды с провалом вместо заднего лепестка.

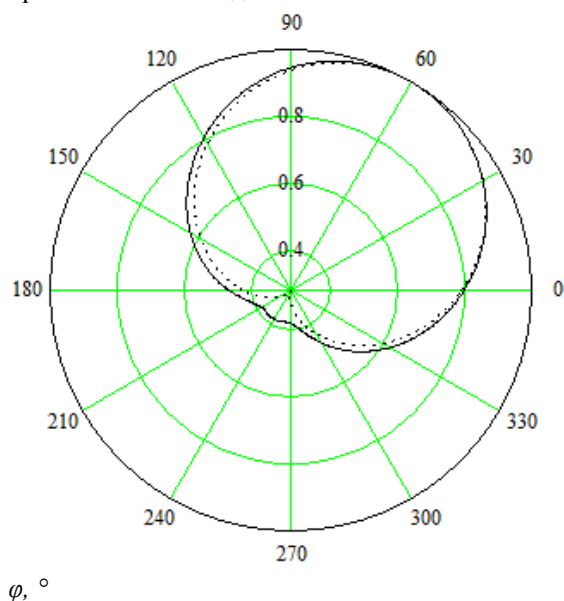


Рис. 5. Диаграммы направленности для угла прихода волны 60° и частоты 450 МГц

Для азимутального угла прихода волны 60° , как для «равносигнального» направления с точки зрения симметрии решетки, наблюдается необычная картина на частотах 900, 1800 МГц (рис. 6 и 7) – боковые и задний лепестки диаграмм направленности трехэлементной решетки практически достигают уровня главного.

Здесь растет неоднозначность т.к. трехэлементная решетка является слишком «редкой» для такой длины волны. По всей

видимости, элементы решетки расположены слишком далеко друг от друга. Более того – диаграмма для частоты 1800 МГц практически рассыпается, видимо, из-за того, что решетка фактически становится двухэлементной, на пути следования электромагнитной волны стоит один из вибраторов, а два оставшихся симметрично от него на равном линейном и угловом удалении, что определяет равные набеги фаз на них и явно не способствует повышению точности.

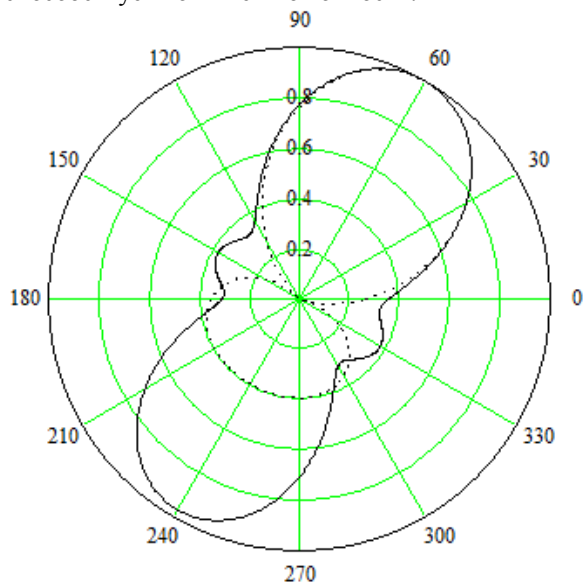


Рис. 6. Диаграммы направленности для угла прихода волны 60° и частоты 900 МГц

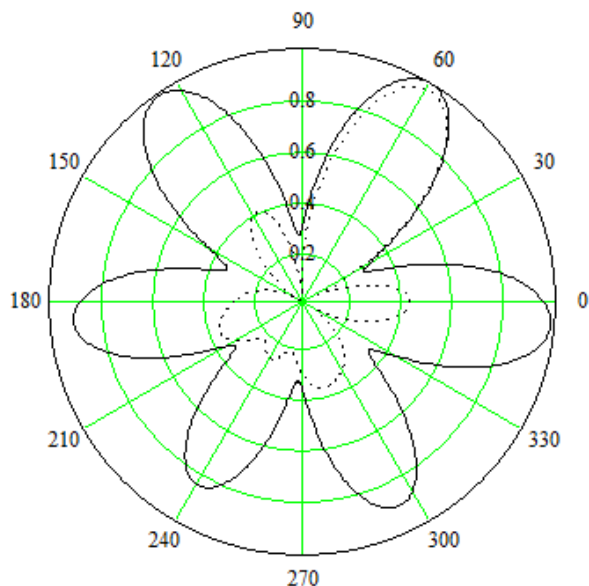


Рис. 7. Диаграмма направленности для угла прихода волны 60° и частоты 1800 МГц

Судя по рис. 8, практически совпадающему по форме с рис. 5, можно сказать, что для частот порядка 450 МГц никакой зависимости от угла поворота, от влияния квадрокоптера как носителя или от строения решетки в данном случае не выявлено.

На рис. 9 для следующей анализируемой частоты 900 МГц и угла прихода волны 90° в случае трехэлементной антенной решетки задний лепесток растет по уровню и раздваивается по сравнению с девятиэлементной, как и на рис. 3, влияния конструкции аппарата носителя здесь также не видно.

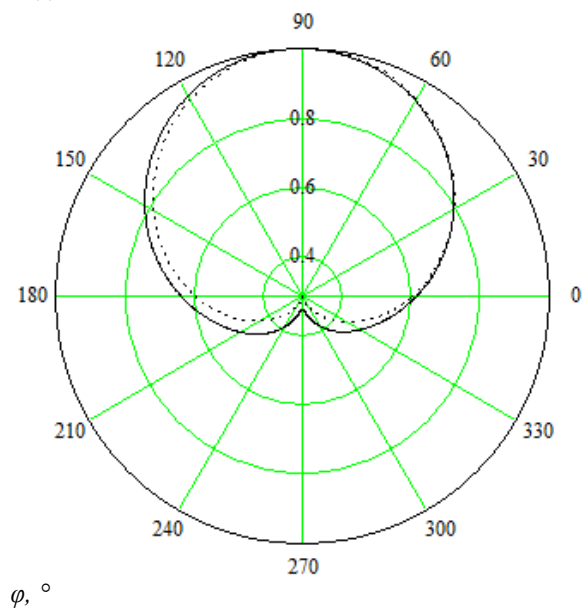


Рис. 8. Диаграмма направленности для угла прихода волны 90° и частоты 450 МГц

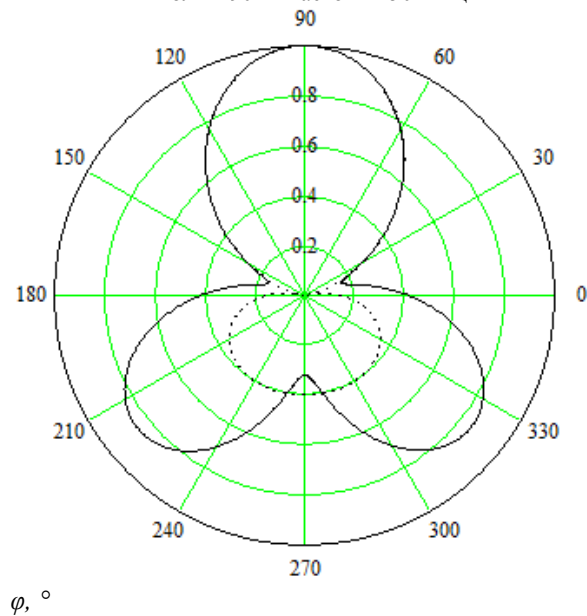


Рис. 9. Диаграмма направленности для угла прихода волны 90° и частоты 900 МГц

На частоте 1800 МГц (рис. 10) на первый взгляд явно видно влияние конструкции квадрокоптера – даже в случае многоэлементной антенной решетки для данного угла падения есть несимметричность диаграммы направленности вследствие присутствия по данному азимуту металлической штанги с электродвигателем. Для трехэлементной антенной решетки это влияние еще более ярко выражено вследствие большей разреженности решетки.

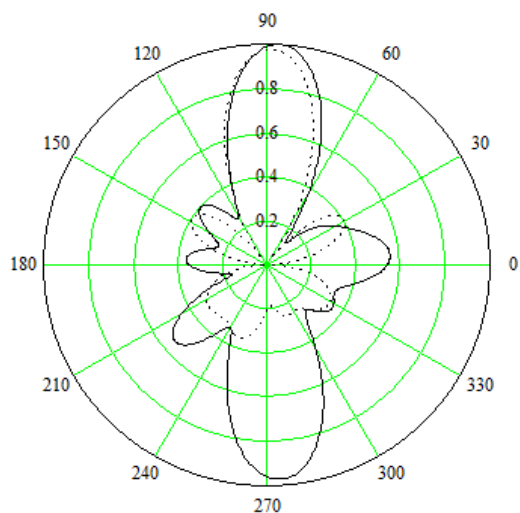


Рис. 10. Диаграмма направленности для угла прихода волны 90° и частоты 1800 МГц

Правда сравнение с рис. 4 показывает на другой источник несимметрии - диаграммы похожи, особенно для трехэлементной решетки. В данном случае можно предположить что три боковых лепестка с одной стороны и два с другой возникают из-за нахождения сразу двух вибраторов с одной стороны вблизи направления распространения волны на одинаковом расстоянии от воображаемого центра системы (три лепестка) и одного несколько дальше от линии распространения проходящей через центр решетки.

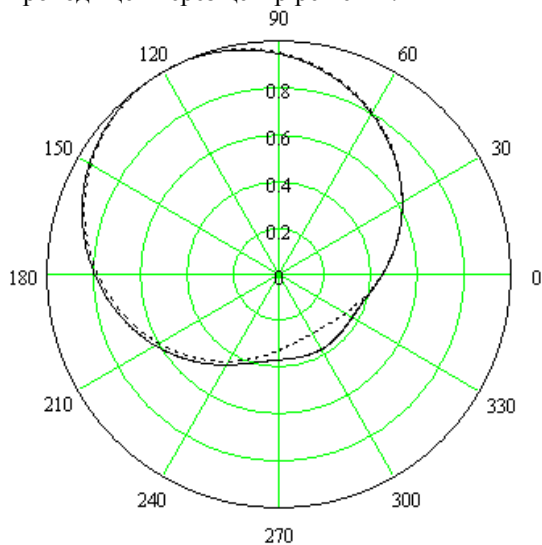


Рис. 11. Диаграмма направленности для угла прихода волны 120° и частоты 450 МГц

Диаграммы направленности для угла прихода волны 120° на рис. 11-13 практически повторяют таковые на рис. 5-7 для трехэлементной антенной решетки вследствие ее некоторой обратной симметрии для углов прихода волны 60° и 120° . Возможно этим объясняется разница в уровне заднего лепестка для частоты 450 МГц, для угла 120° он несколько больше. Девятиэлементная антенная решетка так же является квазисимметричной для данных углов падения, но задние лепестки более выражены уже на двух

частотах 450 и 1800 МГц относительно угла прихода волны 60° . На частоте 900 МГц диаграммы направленности для двух анализируемых углов и конструкций решеток полностью совпадают.

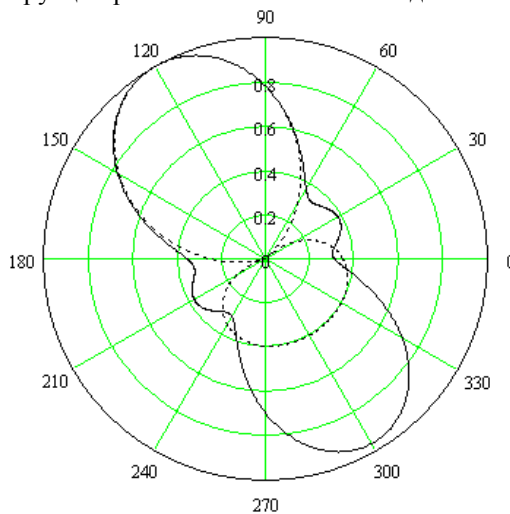


Рис. 12. Диаграмма направленности для угла прихода волны 120° и частоты 900 МГц

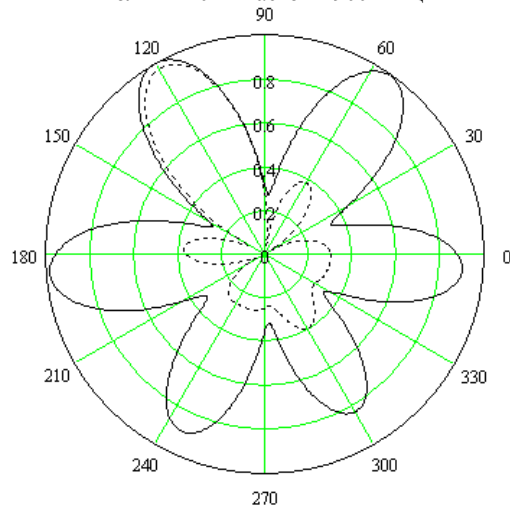
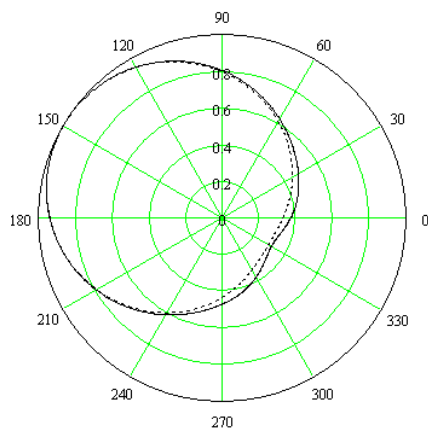


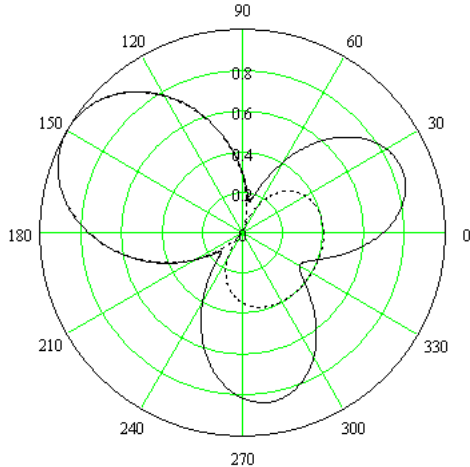
Рис. 13. Диаграмма направленности для угла прихода волны 120° и частоты 1800 МГц

Как уже можно предположить, основываясь на предыдущих рассуждениях диаграммы направленности для угла прихода волны 150° (рис. 14-16) похожи на диаграммы для углов 30° и 90° . Наибольшее сходство отмечается для квазисимметричного угла в 30° . По сравнению с данным углом для анализируемого угла прихода электромагнитной волны 150° в случае девятиэлементной антенной решетки несколько больше «задний лепесток» на частоте 450 МГц, что может быть объяснено как раз таки квазисимметричностью решеток для двух углов.



$\varphi, ^\circ$

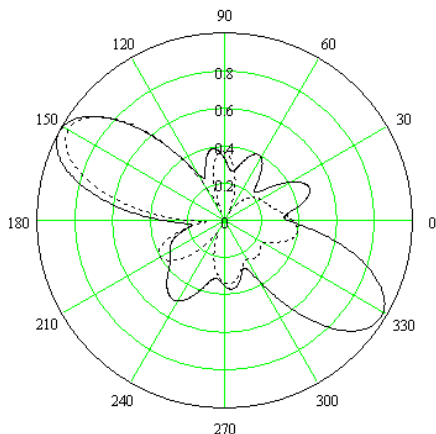
Рис. 14. Диаграмма направленности для угла прихода волны 150° и частоты 450 МГц



$\varphi, ^\circ$

Рис. 15. Диаграмма направленности для угла прихода волны 150° и частоты 900 МГц

По некоторому сдвигу диаграмм направленности для трехэлементной решетки относительно истинного угла прихода электромагнитной волны можно сказать, что без коррекции и/или выяснения причин этого сдвига более точной является девятиэлементная решетка, без учета наличия больших боковых и задних лепестков трехэлементной решетки в некоторых случаях.



$\varphi, ^\circ$

Рис. 16. Диаграмма направленности для угла прихода волны 150° и частоты 1800 МГц

Крайне желательным является анализ уединенной решетки, без носителя для выявления влияния носителя на пеленгационные характеристики. Проведенный в данном случае сравнительный анализ двух антенных решеток не выявил какого либо существенного влияния конструкции носителя.

Для углов прихода электромагнитной волны 0° и 180° не приведены диаграммы направленности, так как они не содержат интересной информации вследствие полной квазисимметричности не только антенных решеток, но и самого носителя для данного случая.

Подводя итог можно сказать, что теоретически даже простейшая трехэлементная конструкция пеленгационной антенной решетки вполне имеет право на жизнь в данном диапазоне частот, по крайней мере для азимутальных углов прихода волны и остается только уточнить радиус решетки и проверить полученные результаты на практике.

Литература

1. Monzingo, R.A. Introduction to Adaptive Arrays [Text] / R.A. Monzingo, T.W. Miller. - New York: SciTech Publishing. - 2004. - 530 p.
2. Skolnik, M.I. Radar handbook [Text] / M.I. Skolnik // The McGraw-Hill Companies. - 2008. - Issue 3. - 1352 p.
3. Balanis, C.A. Modern antenna handbook [Text] / C.A. Balanis. - Canada: by John Wiley and Sons. - 2008. - 1680 p.
4. Ашихмин, А.В. Исследование и разработка сверхширокополосных антенн комплексов радиоконтроля [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / А.В. Ашихмин - Москва: МГТУ, 2006. - 32 с.
5. Разработка пеленгационной антенной решетки расположенной на борту беспилотного летательного аппарата [Текст] / И.С. Бобылкин, А.В. Муратов, Л.А. Носова, А.С. Самодуров // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т.11. - № 6. - С.133 – 135.
6. Численный анализ пеленгационных характеристик кольцевой вибраторной антенной решетки, установленной на борту вертолета [Текст] / А.В. Муратов, В.И. Николаев, Л.А. Носова, А.С. Самодуров // Теория и техника радиосвязи. - 2015. - №4. - С. 30-35.
7. Павлушенко, М. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития [Текст] / М. Павлушенко, Г. Евстафьев, И. Макаренко. - М.: Права человека, 2005. - 611 с.
8. Weiland, T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields [Text] / T. Weiland // Electronics and Communication. - 1977. - V. 31. - PP. 116-120.
9. Taflove, A. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method [Text] / A. Taflove, S.C. Hagness. - Boston, London: Artech house. - 2000. - 866 p.
10. Пастернак, Ю.Г. Структура поля в области расположения кольцевой антенной решетки мобильного базирования [Текст] / Ю.Г. Пастернак, Ю.А. Рембовский // Антенны. - 2007. - №1(116). - С. 30-34.
11. Пастернак, Ю.Г. Метод восстановления электромагнитного поля на плоскости вблизи трехмерного рассеивателя [Текст] / Ю.Г. Пастернак, Ю.А. Рембовский // Антенны. - 2007. - №7(122). - С. 43-48.

THE ANALYSIS OF RADIATION PATTERN OF CIRCULAR ANTENNA ARRAY TAKING INTO ACCOUNT QUANTITY OF ELEMENTS AND INFLUENCE OF THE CARRIER

L.A. Nosova, student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: liy1994@mail.ru

Yu.G. Pasternak, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of department of electronic devices and systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: pasternakug@mail.ru

A.S. Samodurov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Assistant professor of department of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: unaxel2000@mail.ru

For different purposes can be used arrays built for a variety of geometric principles and composed of different elements. In this paper we analyzed the radiation pattern direction-finding antenna array consisting of three and nine vertical half-wave dipoles. The radiation patterns are the reciprocal correlation functions of ideal and real bearings. Formulas for calculation of these functions are given. The antenna array is located on board the unmanned aerial vehicle (quadrocopter). It determines the influence of the media on the grid characteristics, in particular in the radiation pattern. The numerical simulations show a strong dependence of the shape of the number of array elements and a particularly strong influence of the carrier apparatus at high frequency operating range at specific angles of arrival of the electromagnetic wave. For a three-element array identify large levels of rear and side lobes on all analyzed frequencies other than the lowest 450 MHz. Impact carrier is most noticeable at the highest frequency of 1800 MHz with an angle of arrival of a wave of 90°

Key words: radiation pattern, antenna array, quadrocopter

References

1. Monzingo R.A., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. - New York: SciTech Publishing. - 2004. - 530 p.
2. Skolnik M.I. Radar handbook // The McGraw-Hill Companies. - 2008. - Issue 3. - 1352 p.
3. Balanis C.A. Modern antenna handbook. - Canada: by John Wiley and Sons. - 2008. - 1680 p.
4. Ashihmin A.V. Issledovanie i razrabotka sverhshirokopolosnyh antenn kompleksov radiokontrolja [Research and development of superbroadband antennas of complexes of radio control]: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. - Moskva: MGTU, 2006. - 32 s.
5. Bobylkin I.S., Muratov A.V., Nosova L.A., Samodurov A.S. Razrabotka pelengacionnoj antennoj reshetki raspolozhennoj na bortu bespilotnogo letatel'nogo apparata [Development of the direction finding antenna array located onboard the unmanned aerial vehicle] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. - 2015. - T.11. - № 6. - S.133 – 135.
6. Muratov A.V., Nikolaev V.I., Nosova L.A., Samodurov A.S. Chislennyj analiz pelengacionnyh harakteristik kol'cevoj vibratornoj antennoj reshetki, ustanovlennoj na bortu vertoletaja [The numerical analysis of the direction finding characteristics of the ring dipole antenna array established onboard the helicopter] // Teorija i tehnika radiosvjazi. - 2015. - №4. - S. 30-35.
7. Pavlushenko M., Evstaf'ev G., Makarenko I. Bepilotnye letatel'nye apparaty: istorija, primenenie, ugroza rasprostraneniya i perspektivy razvitiya [Unmanned aerial vehicles: history, application, threat of distribution and prospect of development].— M.: Prava cheloveka, 2005.— 611 s.
8. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields [Текст] // Electronics and Communication. - 1977. - V. 31. - PP. 116-120.
9. Taflov A., Hagness S.C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method.- Boston, London: Artech house. - 2000. - 866 p.
10. Pasternak Yu.G., Rembovskij Yu.A. Struktura polja v oblasti raspolozhenija kol'cevoj antennoj reshetki mobil'nogo bazirovanija [Structure of the field in the field of an arrangement of mobile basing ring antenna array] // Antenny. - 2007. - №1(116). - S. 30-34.
11. Pasternak Yu.G., Rembovskij Yu.A. Metod vosstanovlenija jelektromagnitnogo polja na ploskosti vblizi trehmer'nogo rasseivatelja [Method of restoration of the electromagnetic field on the plane near the three-dimensional diffuser] // Antenny. - 2007. - №7(122). - S. 43-48.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДКАХ КРИСТАЛЛА ПЛИС

Е.В. Гончаренко, Т.Г. Меньшикова, М.В. Гречкина, Е.Н. Бормонтов

Надежность полупроводниковых изделий тесно связана с технологией производства и, в особенности, с операциями получения контактных соединений. Одной из наиболее распространенных причин отказов, связанных с процессом производства, является нарушение микросоединений кристалла с корпусом и внутренних выводов с контактными площадками кристалла и корпуса. По данным отечественной и зарубежной литературы от 35 до 60 % всех отказов в радиоэлектронной аппаратуре приходится на долю микросоединений.

На надежность соединений влияют физико-механические свойства материала контактных площадок. Например, акустические условия в зоне УЗС зависят от морфологии покрытий контактных площадок. Для образования прочного и надежного микросоединения необходимо иметь поверхность покрытия контактных площадок с малой высотой микронеровностей и, по возможности, меньшим значением внутренних напряжений в покрытии.

Изучено влияние состояния металлизации контактных площадок кристалла программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) на качество сварного шва. Морфология поверхности алюминиевой металлизации изучалась в полуконтактном режиме атомно-силовой микроскопии. Данные о химическом составе получены методом растровой электронной микроскопии. Визуальный контроль проводился при помощи оптического микроскопа Jenatech с увеличением 1000х

Ключевые слова: алюминиевая металлизация, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), контактная площадка

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление любых ПЛИС завершают операции сборки и монтажа, при которых формируются микросоединения между контактными площадками элементов прибора [1]. Прочность внутренних соединений и его повторяемость напрямую зависит от типа, материала поверхности и проводника, диаметра привариваемого проводника, выбранных режимов сварки и чистоты поверхности. На надежность соединений также влияют физико-механические свойства материала контактных площадок. Например, акустические условия в зоне УЗС зависят от морфологии покрытий контактных площадок [2]. Для образования прочного и надежного микросоединения необходимо иметь поверхность покрытия контактных площадок с малой высотой микронеровностей и, по возможности, меньшим значением внутренних напряжений в покрытии [3].

Цель работы заключается в исследовании морфологии поверхности алюминиевой металлизации контактных площадок кристалла ПЛИС.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе объектом исследования являлась алюминиевая металлизация контактных

площадок ПЛИС серии 5576, изготавливаемых АО «ВЗПП-С». Толщина алюминия в среднем составляла 1 мкм. Размеры контактной площадки 100х100 мкм. Количество контактных площадок на ПЛИС составляет 256 шт. ПЛИС взяты после операции «Разбраковка кристаллов на пластине по электрическим параметрам» с использованием вольфрамовых зондов.

Морфология поверхности исследовалась методом сканирующей силовой микроскопии в полуконтактном режиме на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Solver P47 Pro. При сканировании использовались композитные поликремниевые кантилеверы HA_NC Etalon с радиусом закругления острия зонда 10 нм и резонансными частотами 145 и 232 кГц. Неоднородные свойства поверхности контролировались методом отображения фазы.

Дополнительно морфология образцов контролировалась методом растровой электронной микроскопии на РЭМ JSM-6510LV (JEOL Ltd). Элементный состав пленок определялся с помощью системы энергодисперсионного анализа X-flash (Bruker).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В микроэлектронике проводники создаются с помощью различных видов сварки. В процессе ультразвуковой сварки основой для производства проводников являются колебания с частотой, лежащей вне пределов слышимого диапазона. Именно этот метод используется при создании внутренних соединений ПЛИС серии 5576.

Разварка внутренних соединений производится на установке ультразвуковой сварки Bondjet BJ820 алюминиевой проволокой Ø 35 мкм. В процессе проведения операции

Гончаренко Евгений Владимирович – ВГУ, аспирант, e-mail: zews-00@mail.ru

Меньшикова Татьяна Геннадьевна – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: menzhikova.vrn@mail.ru

Гречкина Маргарита Владимировна – ВГУ, инженер ЦКП НО, e-mail: grechkina_m@mail.ru

Бормонтов Евгений Николаевич – ВГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: me144@phys.vsu.ru

разварки существует проблема – внутренний вывод не приваривается к контактной площадке кристалла (отслоение приваренного внутреннего соединения) (рис. 1). Данный дефект не позволяет дальнейшее использование ПЛИС в работе.

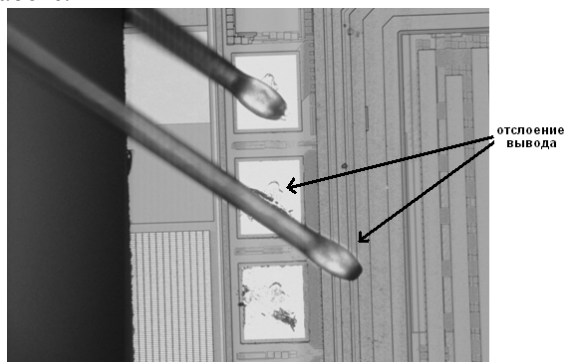


Рис. 1. Отслоение приваренного контактного вывода

Для решения данной задачи необходимо понимание процессов протекающих на поверхности и в объеме алюминиевой металлизации при транспортировке, хранении, проведении контрольных измерений и процессов ультразвуковой сварки.

Морфология поверхности каждого из образцов исследовалась в 5 точках. Площадь сканирования варьировалась от $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ до $67 \times 67 \text{ мкм}^2$. На рис. 2 (а,б,в,г,д,е) приведены изображения характерных участков 3-х разных контактных площадок с площадью сканирования $10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

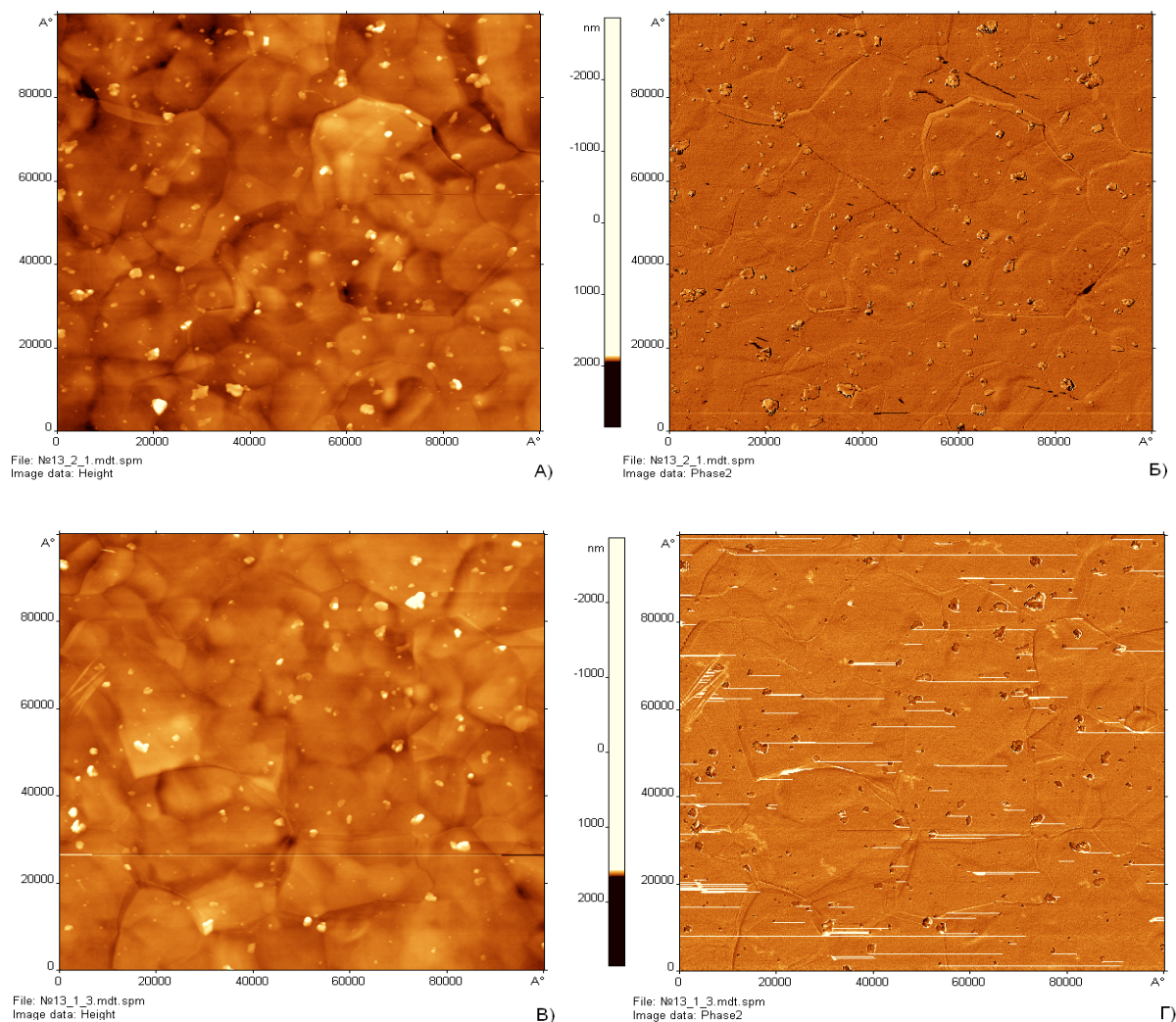


Рис. 2. АСМ-изображение рельефа поверхности (а,в,д) и фазы (б,г,е) пленки алюминия 3-х разных контактных площадок

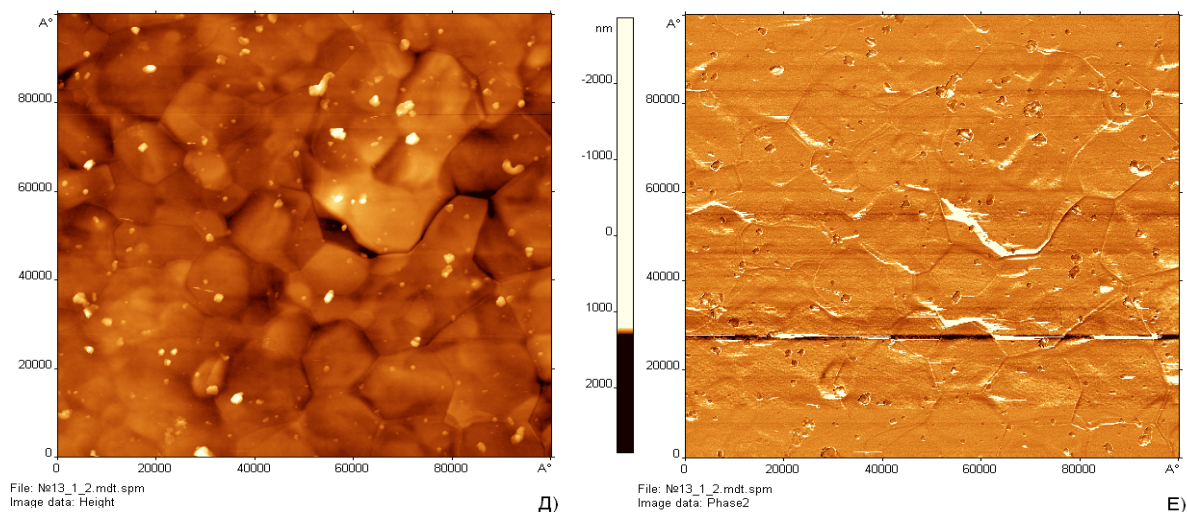


Рис. 2. АСМ-изображение рельефа поверхности (а,в,д) и фазы (б,г,е) пленки алюминия 3-х разных контактных площадок (продолжение)

Поверхность сильно загрязнена. На поверхности пленки присутствуют участки различной формы диаметром от 0,1 до 0,3 мкм и высотой до 150 нм.

Дополнительно исследование образцов проводилось методом растровой электронной микроскопии JSM-6510LV (JEOL Ltd). Элементный состав пленок определялся с помощью системы энергодисперсионного анализа X-flash (Bruker).

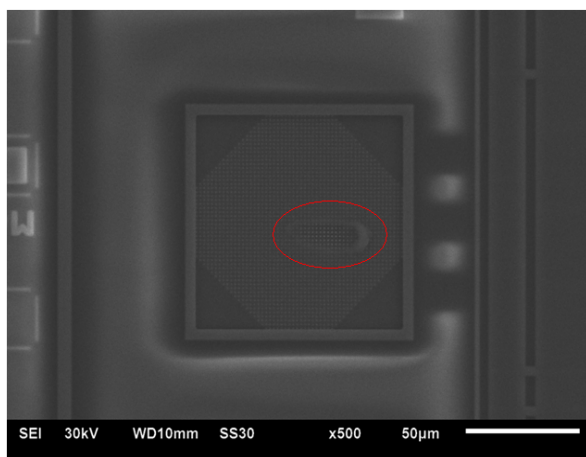


Рис. 3. Изображение контактной площадки, полученное методом РЭМ

На полученном изображении при увеличении x500 мы видим контактную площадку. В центре контактной площадки расположен отпечаток от вольфрамового зонда, полученный при контроле электрических параметров ПЛИС. Так как глубина проникновения электронов в РЭМ может достигать 2 мкм, то на представленном изображении мы наблюдаем поверхность Ti,

которая находится под слоем алюминиевого покрытия.

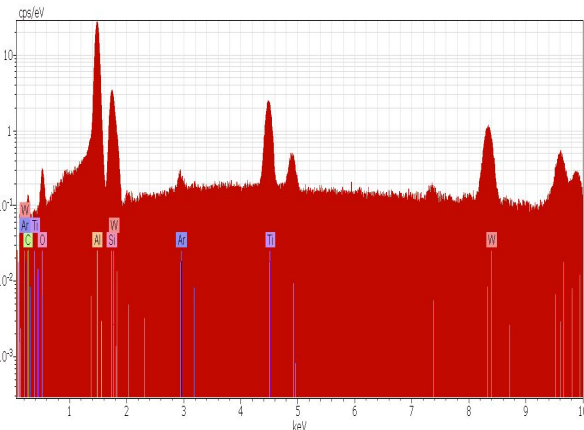


Рис. 4. Элементный состав контактной площадки ПЛИС

Процентное содержание химических элементов в контактной площадке

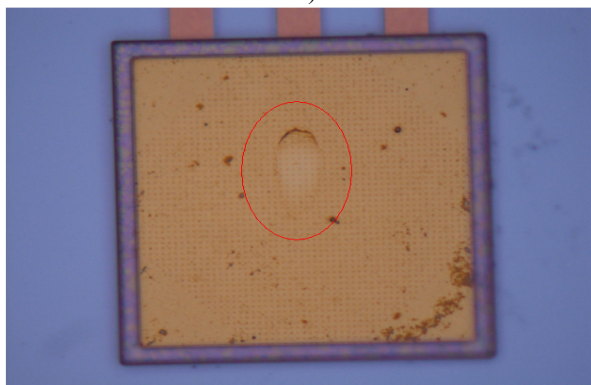
Химический элемент	Wt. %
C	5,708717
O	5,597612
Al	52,03568
Si	13,48945
Ar	0,570771
Ti	12,23532
W	10,36245

Наличие вольфрама в элементном составе контактной площадки может объясняться проведением контроля электрических параметров с использованием вольфрамовых зондов.

На рис. 5 представлена поверхность пленки алюминия, снятая на оптическом микроскопе Jenatech с увеличением $\times 1000$.



а)



б)

Рис. 5. Поверхность контактной площадки а) до снятия алюминиевого покрытия, б) после снятия алюминиевого покрытия

В центре контактной площадки расположен отпечаток от зонда. Размер отпечатка 15×40 мкм. Для анализа глубины проникновения вольфрамового зонда проводилось снятие

алюминиевого покрытия путем химического травления в 10 % водном растворе КОН при температуре 80°C в течение 20 минут.

После снятия алюминиевого покрытия мы также наблюдаем отпечаток, что свидетельствует о достаточно глубоком проникновении вольфрамового зонда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что проведение операции «разбраковка кристаллов на пластине по э/п», с использованием зондовой установки, при разновысотном расположении зондов, приводит к разрыву алюминиевой металлизации. В результате чего алюминиевые выводы не привариваются к контактным площадкам ПЛИС.

Результаты исследований получены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием ВГУ.

Литература

1. Зенин В.В. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий [Текст]: монография / В.В. Зенин. Воронеж: ВГТУ, 2013. – С. 205.
2. Арутюнов П.А. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.И. Демидов // Заводская лаборатория. – 1999. – Т. 65. – №9. – С. 31–41.
3. Смолин В.К. Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах [Текст] / В.К. Смолин // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33. – №1 – С. 10-16.

Воронежский государственный университет
Воронежский государственный технический университет

MORPHOLOGY ALUMINUM METALLIZATION ON THE FPGA CHIP CONTACT PADS

E.V. Goncharenko, post-graduate, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: zews-00@mail.ru

T.G. Menshikova, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: menshikova.vrn@mail.ru

M.V. Grechkina, engineer of the center for collective use of scientific equipment, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: grechkina_m@mail.ru

E.N. Bormontov, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: me144@phys.vsu.ru

The reliability of semiconductor devices is concerned with the production technology, especially with contact connections operations. One of the most common causes of failures, related to the process of producing, is a damage of the

crystal and case microjoints and inner connectors with contact pads of crystal and case. According to native and foreign literature from 35 to 60% of all failures in electronic devices caused by mikrojoints.

Physics mechanical properties of the platforms material affect on the reliability of connections. For example, acoustic conditions at the USW zone depend on morphology of contact platforms covering. In order to form strong and reliable microjoint is necessary to have contact platforms covering with small height of microroughnesses and, whenever possible, smaller value of internal tension.

The Influence of a condition of FPGA crystal contact platforms metallization on quality of a weld seam was studied. The morphology of a surface of aluminum metallization was studied using atomic-force microscopy (AFM) in the semi-contact mode. Chemical composition data were obtained by scanning electron microscope (SEM) method. Visual check was performed using Jenatech optical microscope with increase 1000x

Key words: aluminum metallization, programmable logic integrated circuits (FPGAs) pad

References

1. Zenin V.V. Montazh kristallov i vnutrennih vyvodov v proizvodstve poluprovodnikovyyh izdelij [Installation of crystals and internal conclusions in production of semiconductor products]: monografiya / V.V. Zenin // FGBOU VO "Voronezhskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet". – 2013. – S. 205.
2. Arutyunov P.A. Sistema parametrov dlya analiza sherokhovatosti i mikrorel'efa poverkhnosti materialov v skaniruyushchei zondovoi mikroskopii [System parameters for the analysis of surface roughness and micro-relief materials in scanning probe microscopy] / P.A. Arutyunov, A.L. Tolstikhina, V.I. Demidov // Zavodskaya laboratoriya. – 1999. – Vol. 65. – N. 9 – P. 31 – 41.
3. Smolin V.K. Osobennosti primeneniya alyuminievoi metallizatsii v integral'nykh skhemakh [The application features an aluminum metallization in integrated circuits] / V.K. Smolin // Mikroelektronika. – 2004. – Vol. 33. – N. 1 – P. 10-16

РЕФЛЕКСИВНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СТРУКТУР

Д.Ю. Крюков, А.В. Останков

Представлен обзор наиболее известных и широко используемых типов антенн дифракционного излучения, включающий подробное описание электродинамических особенностей их функционирования. В рассматриваемых антенных системах используется явление преобразования поверхностных электромагнитных волн в объемные волны на периодических неоднородностях. Для большинства из описанных антенн приведены основные электрические и конструктивные параметры. Установлено, что дифракционные антенны вытекающей волны на основе излучающих линий передачи обладают сравнительно высоким коэффициентом полезного действия и малыми массогабаритными характеристиками. Другим важным достоинством антенн дифракционного излучения является их механическая и электрическая прочность, которая позволяет им находить применение в радиотехнических системах, работающих в сложных механических и климатических условиях. Обозначены возможные направления дальнейшего совершенствования и модернизации антенн дифракционного излучения

Ключевые слова: антенна, периодическая решетка, поверхностная волна, дифракционное излучение

Современное научное направление техники и технологии дифракционных антенных решеток берет свое начало с 70-х годов XX-го века. Единовременно под руководством академика В.П. Шестопалова были проведены основополагающие теоретические и экспериментальные исследования рассеяния поверхностных волн диэлектрического волновода (ДВ) на дифракционной решетке (ДР) с пространственной периодичностью (весьма важно, чтобы период решетки был соизмерим с длиной дифрагирующей волны) [1]. Результаты этих исследований показали возможность эффективного преобразования энергии неоднородных плоских электромагнитных волн в энергию объемной рассеянной волны и управления такими ее характеристиками, как направление излучения и поляризация. Дальнейшее развитие научно-исследовательской работы в этой области позволило получить с помощью ДР высоконаправленное электромагнитное излучение в окружающем свободном пространстве и, как следствие, открыло перспективы использования этого явления в антенной технике.

Разработанные на основе явления дифракции СВЧ и КВЧ устройства, поддерживающие поверхностную волну, трансформирующуюся в объемные электромагнитные волны, принято классифицировать как антенны бегущих (вытекающих) или поверхностных волн [2-6]. Одним из наиболее важных и актуальных в настоящее время направлений научного поиска в теории и технике высокоэффективных антенн дифракционного излучения (АДИ) является исследование особенностей поведения неоднородных электромагнитных волн при их взаимодействии с различного рода рассеивающими структурами, например, квазипериодическими эквидистантными или неэквидистантными.

В настоящей работе с использованием метода рефлексивного анализа (от лат. *reflexio* – обращение назад) составлен краткий обзор конструкций и электрических характеристик широко распространенных типов антенн дифракционного излучения. Применение метода рефлексивного анализа позволит, на наш взгляд, систематизировать и обобщить имеющуюся разрозненную информацию об антеннах из открытых первоисточников и представить ее в контексте исторического развития инженерных решений в области антенн дифракционного излучения.

Таким образом, цель работы заключается в исследовании современного состояния техники антенн, использующих явление преобразования поверхностных волн в объемные волны на периодических препятствиях, а также в установлении перспективных направлений их дальнейшего совершенствования и модернизации.

Наибольшее распространение для практического применения получили плоские антенные решетки. За счет низкого профиля они обладают малыми массогабаритными характеристиками, а также удовлетворяют требованиям ГОСТ Российской Федерации к конструкции [7-9] в части обеспечения высокой механической прочности, износоустойчивости и возможности выдерживать интенсивные ветровые нагрузки. Одновременно с этим АДИ на основе ДР имеют сравнительно высокий коэффициент полезного действия (КПД), который при минимизации величины отражения вытекающей поверхностной волны может достигать 95 % и более [1].

На рис. 1 представлена типовая электродинамическая схема линейного варианта АДИ, включающая устройство возбуждения поверхностной волны 1 (в данном варианте – рупорно-линзовое устройство), ограниченный планарный диэлектрический волновод 2 в качестве волноводной линии передачи и металлическую дифракционную решетку типа гребенки 3 в качестве замедляющей (отражающей) структуры.

Крюков Дмитрий Юрьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: kryukovdy@bk.ru

Останков Александр Витальевич – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: avostankov@mail.ru

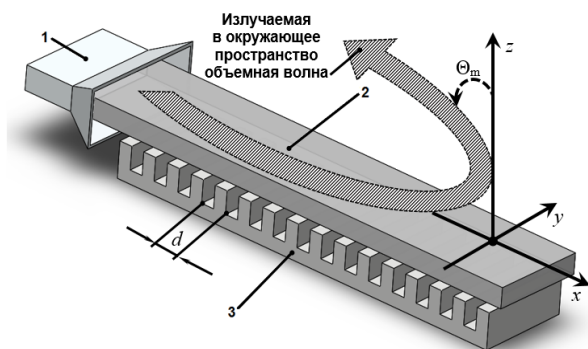


Рис. 1. Типовая конструкция плоской линейной АДИ: 1 – устройство возбуждения; 2 – ограниченный планарный диэлектрический волновод; 3 – эквидистантная гребенчатая периодическая решетка

Изображенная на рис. 1 гребенчатая решетка 3 представляет собой периодическую последовательность канавок прямоугольного профиля, прорезанных в металлическом основании и ориентированных параллельно оси y . Такая гребенка обладает свойством анизотропии, а именно, распространение волн в направлениях y и z подчиняется разным законам. Подобная реализация антенного раскрыва приводит к синфазному сложению излучаемых идентичными полостями (канавками) решетки парциальных волн, которые интерферируя, формируют плоскую излучаемую (объемную) волну, уходящую под некоторым углом Θ_m от структуры (рис. 1). Направление максимального излучения Θ_m определяется замедлением u_B примененного ДВ с учетом возмущения гребенкой и электрической величины периода гребенки d/λ (λ – длина излучаемой волны):

$$\Theta_m = -\arcsin\left(u_B + \frac{n\lambda}{d}\right),$$

где n – порядковый номер излучаемой пространственной гармоники [1]. Важнейшая особенность, специфичная для всех без исключения АДИ заключается в последовательном питании переизлучающих элементов ДР. В соответствии с этим, данному типу антенн присуща определенная зависимость углового положения максимума диаграммы направленности (ДН) от частоты (электрического размера периода дифракционной решетки) и коэффициента замедления поверхностной волны u_B в распределительно-излучающей системе [1,11]. Такая *угло-частотная зависимость* используется для создания специализированных механически неподвижных антенных систем с электрическим сканированием диаграммы направленности (ДН) [12].

АДИ, показанная на рис. 2, является одной из первых отечественных запатентованных конструкций антенн бегущей волны [5], принцип действия которой основан на эффекте преобразования ДР поверхностных волн круглого ДВ в объемные электромагнитные волны, излучаемые в окружающее свободное пространство. Представленная антенная система (рис. 2), в отличие от типовой плоской АДИ (рис. 1), способна обеспечить сканирование лучом на фиксированной рабочей частоте и функционирует следующим образом.

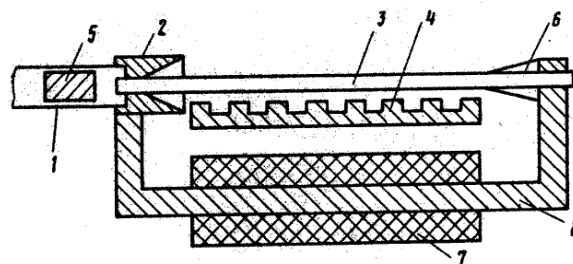


Рис. 2. Структурная схема АДИ с ферритовыми элементами управления положением ДН: 1 – питающий волновод; 2 – возбуждающий переход; 3 – диэлектрический волновод; 4 – гребенчатая ДР; 5 – поляризатор; 6 – конический наконечник; 7 – управляющая катушка; 8 – П-образный магнитопровод

Электромагнитная волна, вытекающая из питающего волновода 1 через возбуждающий переход 2, активизирует поверхностную волну в ДВ 3. Поверхностная волна, распространяющаяся вдоль ДВ, последовательно возбуждает элементы переизлучающей периодической гребенчатой ДР 4 с фазовым сдвигом, определяемым периодом решетки и фазовой скоростью поверхностной волны. Вдоль ДВ 3, выполненного в виде круглого ферритового стержня, могут распространяться два основных типа электромагнитных колебаний с различным направлением вращения вектора поляризации. Волны, циркулирующие вдоль ДВ 3, являются медленными (распространяются со скоростью u_ϕ , меньшей скорости света) и их поле убывает по экспоненциальному закону в направлении, перпендикулярном к направлению распространения. При намагничивании ферритового стержня постоянным магнитным полем фазовые скорости u_ϕ этих колебаний различны.

Поляризатор 5, установленный в питающем волноводе 1, предназначен для возбуждения только одного типа колебаний. Возбуждающий переход 2 и конический наконечник 6, соединенные с П-образным магнитопроводом 8, образуют замкнутый контур магнитного потока. Варьируя силу тока в управляющей катушке 7, можно изменять величину постоянного намагничивающего поля и, как следствие, фазовую скорость u_ϕ поверхностной волны, распространяющейся вдоль ДВ 3. Тем самым, осуществляется управление фазовым фронтом электромагнитной волны, формируемой отражающей гребенчатой ДР 4, и обеспечивается сканирование лучом антенны на заданной рабочей частоте.

Данная антенна может одинаково эффективно работать как в режиме излучения, так и в режиме приема [5]. К сожалению, данные об электрических характеристиках и результатах натурных испытаний не представлены. Недостатком такой антенны являются ограниченность скорости сканирования ДН, обусловленная инерционностью ферритового элемента управления, и изменение направления луча антенны из-за независимости свойств феррита при переходе в режим приема. Для сохранения направления луча в режиме приема, аналогичного направлению в режиме излучения, необходимо изменить направление поля намагничивания [5].

Другая основополагающая конструкция антенны дифракционного излучения, заслуживающая не меньшего внимания, изображена на рис. 3. Эта антенна вытекающей волны предназначена для работы в миллиметровом диапазоне длин волн, характеризуется возможностью дискретной вариации величины периода решетки электронно-оптическим способом, и позволяет обеспечить эффективность преобразования поверхностных волн ДВ 3 в излучаемую волну (КПД) более 90% [6].

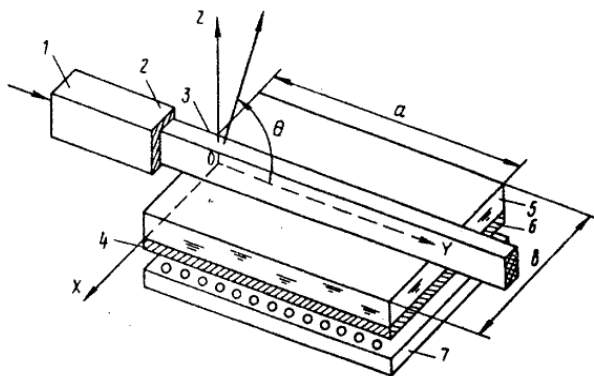


Рис. 3. Структурная схема АДИ с электронно-оптическим сканированием ДН: 1 – питающий волновод; 2 – возбуждающий переход; 3 – диэлектрический волновод; 4 – периодическая решетка; 5 – полупроводниковая пластина; 6 – оптически прозрачный экран; 7 – матрица светоизлучающих диодов

В качестве распределительно-излучающей системы репрезентативной конструкции АДИ (рис. 3) использована классическая электродинамическая схема (рис. 1): "прямоугольный ДВ 3 – периодическая гребенчатая ДР 4". Переизлучающая периодическая гребенчатая решетка 4 расположена под ДВ 3 на расстоянии не более четверти рабочей длины волны, что обеспечивает ее эффективное влияние на поле диэлектрического волновода 3. Следует заметить, что расстояние между линией передачи (диэлектрическим волноводом) и ДР выбирается, как правило, такой величины, чтобы исключить сильную связь ДВ с периодической ДР, поскольку в последнем случае эффективность отбора мощности на излучение может значительно уменьшаться.

Особенность работы вышеприведенной конструкции (рис. 3) заключается в оптическом управлении ДН. Так, при включении элементов матрицы светоизлучающих элементов (диодов) 7 их излучение проходит сквозь оптически прозрачный экран 6 и попадает на поверхность полупроводниковой пластины 5, резко увеличивая электропроводность освещенных областей. Поскольку в матрице светоизлучающих диодов 7 элементы расположены параллельными друг другу рядами, полупроводниковая пластина 5 трансформируется в плоскую полупрозрачную ДР, аналогичную ленточной решетке с диэлектрическим заполнением, эффективно рассеивающую поверхностные электромагнитные волны ДВ 3 и формирующую, таким образом, поле объемной излучаемой антенной волны. Изменяя периодичность включения светоизлучающих элементов 7, можно изменять период подобной квазиленточной

ДР 4 и, соответственно, осуществлять сканирование ДН антенны. Описанная в [6] конструкция антенны вытекающей волны потенциально гарантирует относительно высокую эффективность преобразования поверхностных электромагнитных волн в объемные волны при электрическом сканировании лучом и обладает существенно большим быстродействием при работе в режиме сканирования по сравнению с антеннами, использующими ферритовые элементы управления ДН.

АДИ, предложенные в [13,14], ориентированы на использование в современных системах радиосвязи, радиолокации и в охранных устройствах, а также в системах приема передач спутникового телевизионного и радиовещания СВЧ и КВЧ. На рис. 4 представлена конструкция планарной дифракционной антенны с управляемой поляризацией, предложенная в работе [13].

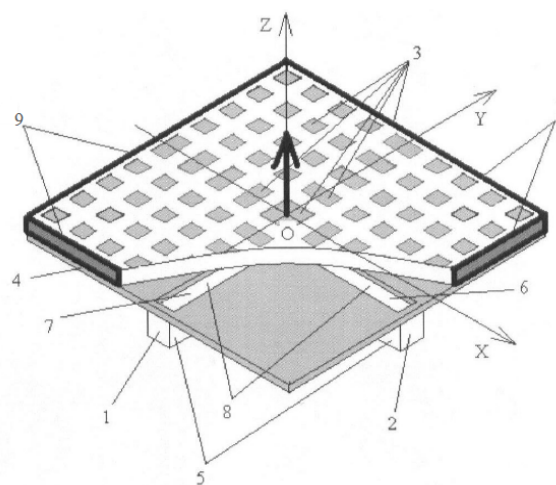


Рис. 4. Плоская АДИ с управляемой поляризационной характеристикой: 1,2 – линейные решетки вспомогательных излучающих элементов; 3 – плоский ДВ с двумерной решеткой излучателей; 4 – металлический экран; 5 – устройство возбуждения; 6,7 – отверстия в экране; 8 – крестообразная щель; 9 – металлические бортики

Целью подобного конструктивно-технического решения является обеспечение работы антенны в режиме излучения по нормали к плоскости раскрыва с управлением поляризацией волны и расширенной полосой рабочих частот. Первое обусловлено применением интерферометрической схемы возбуждения раскрыва и реализацией режима дифракции Брэгга [11]. Управление поляризацией излучения связано с реализацией возбуждения излучающего раскрыва поверхностными волнами взаимно перпендикулярных направлений, а также с использованием двумерно-периодичной ДР.

По периметру плоского ДВ могут быть установлены либо согласованные нагрузки 9 в виде пластин, поглощающих электромагнитные волны (что позволяет расширить полосу рабочих частот), либо металлические бортики высотой порядка толщины волновода, имеющие электрический контакт с экраном (что дает возможность увеличить КПД антенны). Более того, в данной конструкции между плоским ДВ и металлическим экраном можно располо-

жить дополнительный планарный диэлектрический слой, в частности, в виде воздушного зазора толщиной не более $(0.3 - 0.5)\lambda$, позволяющий снизить тепловые потери в излучающем раскрытии и, соответственно, повысить КПД антенны.

Работоспособность описанной в [13] антенны (рис. 4) подтверждена результатами компьютерного электродинамического моделирования при работе в режиме излучения, при котором имитировалось поочередное возбуждение ортогональных щелей в одномодовом режиме с косинусоидальным амплитудным распределением напряженности электрического поля в одном из двух отверстий, образующих крестообразную щель. Конструктивно-технические параметры моделируемой антенны: размер излучающего раскрытия 23×23 см², материал плоского ДВ – полиэтилен с относительной диэлектрической проницаемостью 2.25, толщина ПДВ – 6 мм, габариты желобковых волноводов – 12×10 мм², толщина подложек с относительной диэлектрической проницаемостью 2.0 полосковых решеток – 3 мм, ширина полосковых проводников – 1 мм, ширина и длина излучателей – 4 и 10 мм, период расположения излучателей – 24 мм, внутренний диаметр круглого волновода – 20 мм, ширина отверстий, образующих крестообразную щель в экране ПДВ – 4 мм.

Моделирование показало, что базовый вариант антенны обеспечивает работу с коэффициентом усиления (КУ) не менее 27.4 дБ на частоте 9.6 ГГц. Относительная рабочая полоса частот при таком КУ, по заверению авторов, равна 6.7%. Ширина главного лепестка ДН по уровню "минус" 3 дБ составила 10° в горизонтальной (E) и вертикальной (H) плоскостях при максимальном уровне боковых лепестков (УБЛ) "минус" 16.5 и "минус" 18 дБ соответственно. Модуль коэффициента отражения по напряжению на входе антенны не превысил "минус" 10 дБ в полосе частот от 9.4 до 10.0 ГГц [13].

На рис. 5 изображен пример конструктивного исполнения плоской АДИ, заявленной в [14] и предназначенной для работы с фиксированным типом линейной поляризации излучения. Конструктивно-техническое решение, во многом аналогичное [13], также призвано повысить эффективность антенны, расширить полосу рабочих частот, улучшить согласование с питающей линией передачи и обеспечить компактные габаритные размеры при условии реализации ДН с лучом в направлении нормали к излучающему раскрытию АДИ.

Для уменьшения массы и минимизации габаритных размеров конструкции антенны (рис. 5) устройство возбуждения выполнено аналогично малоразмерной линейной антенной решетке – в виде металлического желобкового волновода 6, в котором на диэлектрической подложке 7 размещена линейная решетка в виде системы металлических полосковых элементов 8. Работоспособность представленной конструкции АДИ подтверждена не только путем электродинамического моделирования, но и экспериментальными исследованиями в диапазоне СВЧ – на частотах 9 - 10 ГГц. Авторами сообщается, что полоса рабочих частот антенны по

уровню коэффициента стоячей волны (КСВ), равному двум, составила 5%. При максимальном коэффициенте усиления 28.7 дБ антенна обладает предельной эффективностью 74 %.

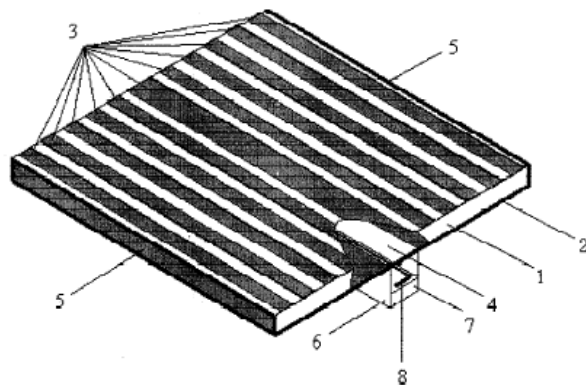


Рис. 5. АДИ с фиксированным типом поляризации излучения: 1 – плоский ДВ; 2 – металлический экран; 3 – ДР из металлических лент; 4 – щель связи; 5 – металлические, отражающие бортики; 6 – металлический желобковый волновод; 7 – диэлектрическая подложка; 8 – система металлических полосковых элементов

Представленные на рис. 4 - 5 конструкции АДИ обеспечивают прием и излучение волн в режиме работы на "минус" первой пространственной гармонике ($n = -1$). Функционирование АДИ обеспечивается на длине волны, при которой замедление поверхностной волны плоским ДВ идентично отношению длины волны к периоду ДР. При таких условиях излучение обеих частей раскрытия оказывается синфазным в направлении нормали к его плоскости (имеет место резонансная дифракция Брэгга второго порядка) [1]. Поскольку элементы двумерно-периодической ДР 3 (рис. 4) и лент ДР 3 (рис. 5) имеют ширину порядка периода решетки, а толщина плоского ДВ выбирается примерно равной четверти длины волны в диэлектрике, гарантируется незначительная величина коэффициента отражения по входу антенны, так что КСВ на рабочей длине волны может быть близким к единице. Удовлетворительное согласование, как показывают моделирование и эксперимент, сохраняется в полосе частот, превышающей 5%. Использование же поверхностных волн плоского ДВ для последовательного и однократного возбуждения элементов ДР позволяет обеспечить высокий КПД антенны. При относительной толщине плоского ДВ не более 0.2 - 0.3 максимальной длины волны излучения гарантируется одномодовый режим распространения волны типа ТМ, что дает возможность реализовать относительно низкий уровень паразитной (ортогональной) поляризации излучения. Плоская антенна [13] обеспечивает работу с управляемой поляризацией в режиме излучения по нормали к плоскости раскрытия. Это достигается за счет того, что при возбуждении плоского ДВ из центра излучающий раскрыв для любой из ортогональных поляризаций разбивается на две квазисимметричные части, длины которых составляют половину длины всего раскрытия. Следовательно, полоса рабочих частот антенны увеличи-

вается в два раза по сравнению со случаем возбуждения такой же точно конструкции со стороны торца плоского ДВ.

В работах [15-16] описана реализованная на практике конструкция планарной АДИ миллиметрового диапазона (рис. 6), характеризующаяся относительно низким уровнем бокового излучения.

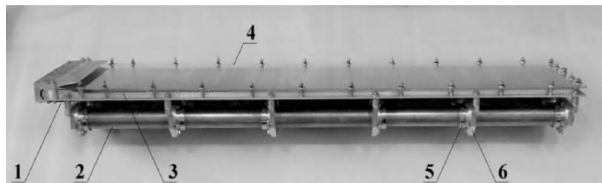


Рис. 6. Планарная АДИ с низким уровнем УБЛ: 1 – основание антенны; 2 – трубная рама жесткости; 3 – ДР; 4 – плоский ДВ; 5 – крепежные фланцы; 6 – силовой элемент для крепления основания (нервюра)

АДИ имеет апертуру размером $1000 \times 200 \text{ мм}^2$. На основании 1 крепятся составные части излучающего раскрыва: пять периодических дифракционных решеток 3, плоский ДВ 4, рупорно-линзовое устройство возбуждения с выходным волноводом и разворотом на 180° . Рама жесткости 2 собрана на базе двух полых металлических труб диаметром 40 мм и длиной 1050 мм. С помощью фланцев 5 к алюминиевым трубам крепятся нервюры 6, которые в свою очередь служат для жесткого крепления основания антенны 1. Для защиты антенны от агрессивных факторов внешней среды может быть использован обтекатель – герметизирующий радиопрозрачный кожух. При этом АДИ будет представлять собой абсолютно герметичную конструкцию и может быть закреплена на ровной поверхности с отклонением от плоскостности не более $\pm 0.1 \text{ мм}$. Полная герметизация охватывает при этом только саму антенну без рамы жесткости 2, которая отделена от корпуса антенны специальным герметизирующим листом.

Описанная дифракционная антенна вытекающей волны характеризуется линейной горизонтальной поляризацией излучения и имеет коэффициент усиления 41.4 дБ в диапазоне рабочих частот 34 ГГц $\pm 0.5 \text{ ГГц}$. Ширина ДН составляет $0.64 \times 2.95^\circ$, УБЛ – "минус" 31.4 дБ и "минус" 25 дБ соответственно. Максимальные потери не превышают 1.3 дБ. Суммарная толщина АДИ составляет не более двух длин волн, при использовании обтекателя – порядка пяти длин волн при больших размерах апертуры.

Предложенная в [17] плоская антенная решетка дифракционного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн (рис. 7) состоит из совокупности направляющих систем поверхностных волн в виде прямоугольных диэлектрических волноводов 1, расположенной под углом к двумерной периодической гребенчатой решетке 2, и возбуждателя поверхностных волн в виде компактного делителя мощности волноводного типа 3. Подобная конструкция позволяет обеспечить более равномерную излучательную способность всей апертуры антенны за счет ориентации системы ДВ под углом к периодической ДР, что приводит к увеличению эф-

фективности взаимодействия поверхностной волны ДВ и гребенчатой ДР при удалении от возбудителя к периферии раскрыва. В результате этого коэффициент использования поверхности (КИП) антенны увеличивается. Другим положительным свойством репрезентативной АДИ (рис. 7) является возможность обеспечения требуемого фазового распределения на выходах делителя мощности 3, что достигается за счет помещения в выходные волноводы диэлектрических вставок различной длины, которые приводят к дополнительному сдвигу по фазе. Для достижения наилучшего согласования диэлектрические вставки выполняются неразъемным образом с соответствующими прямоугольными диэлектрическими волноводами, а их концы имеют скос в 45° .

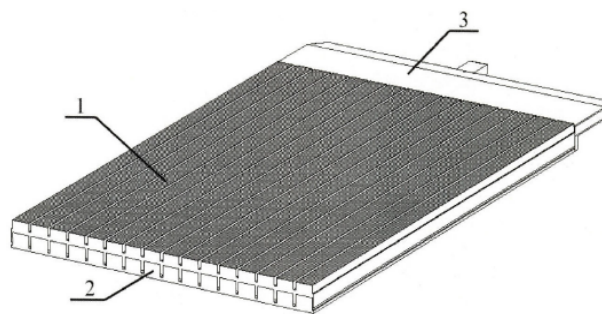


Рис. 7. Плоская антенная решетка дифракционного излучения с делителем мощности: 1 – совокупность прямоугольных ДВ; 2 – двумерная периодическая гребенчатая ДР; 3 – делитель мощности волноводного типа

Данные по численным значениям конструктивных и электрических параметров описанной АДИ отсутствуют. В [17] указывается, что подобная плоская АДИ имеет повышенную технологичность и позволяет обеспечить относительно низкий УБЛ и одновременно увеличить коэффициент направленного действия (КНД) и КИП.

На основе проведенного сравнительного анализа опубликованных научных работ и патентных свидетельств в области техники и технологии антенн можно прийти к следующему выводу. Несмотря на общую тенденцию к реализации электронного управления ДН в АДИ, по-прежнему, достаточно широко применяется и электромеханический способ сканирования, при котором, однако, гарантируется отсутствие трения между ДВ и ДР. Такие конструкции антенн обладают хорошей износостойкостью и способны обеспечить высокую надежность при интенсивной работе [16,18].

Конструкция дифракционной антенной системы с управляемым положением ДН представлена на рис. 8,а, схема управления угловым положением ДН изображена на рис. 8,б [18]. Такая антенна дифракционного излучения предназначена для работы в миллиметровом диапазоне длин волн и может быть использована в составе радиолокационных систем предупреждения столкновений и в различных системах радиосвязи. Основными составными частями антенной системы 1 служат диэлектрический гребневый волновод 17, представляющий собой периодическую или квазипериодическую последователь-

ность прямоугольных канавок 15 в слое диэлектрика, подсистема возбуждения 11 и планарный многослойный рефлектор 5.

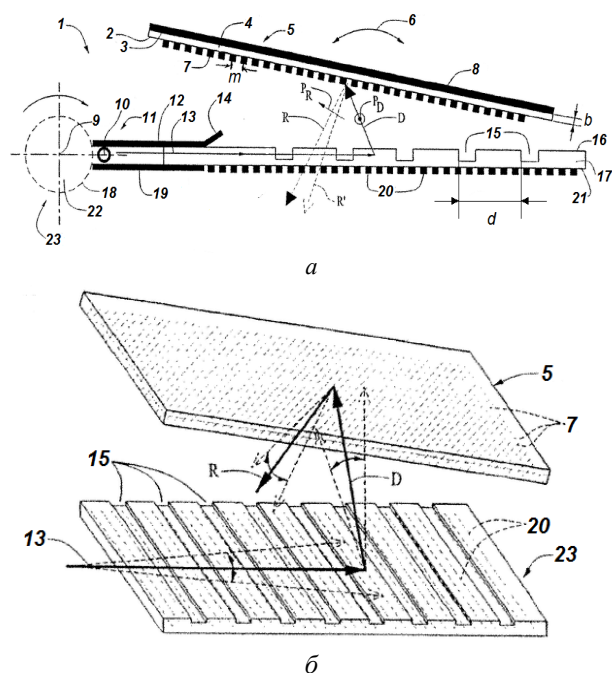


Рис. 8. Электродинамическая схема антенной системы дифракционного излучения: *а* – общая схема управляемой антенной системы; *б* – схема управления

Период канавок гребневого ДВ выбирается таким, чтобы гарантировать излучение объемной электромагнитной волны в направлении, указанном стрелкой D (рис. 8, *а*), то есть под углом к направлению распространения вытекающей поверхностной волны 13. Планарный отражатель 5 содержит в себе диэлектрический слой 4 с нижней поверхностью 2, на которой размещена решетка из параллельных друг другу металлических планарных элементов (полосок) 7, и верхней поверхностью 3, с расположенной на ней металлической пластиной 8. Расстояние m между металлическими полосками 7 составляет около $1/10$ рабочей длины волны. Толщину диэлектрического слоя рефлектора b рекомендуется выбирать равной четверти рабочей длины волны.

Подсистема возбуждения 11 содержит сканирующий вращающийся элемент 24 с набором ДР, отличающихся периодами, и соединенную с ним диэлектрическую линию передачи 10, а так же нижнюю 19 и верхнюю 12 токопроводящие пластины волновода. Линия передачи 10 представляет собой удлиненный палочковидный ДВ с круглым поперечным сечением. Допускается использование ДВ с другими конфигурациями поперечного сечения, например, волноводы прямоугольной или квадратной формы. Сканирующий элемент антенны, в изображенном варианте (рис. 8, *а*), содержит барабан 22, который вращается при помощи электромеханического устройства вокруг оси вращения, параллельной диэлектрической линии передачи 10 и проходящей через центр 9 барабана 22.

Для предотвращения излучения электромагнитных волн через зазоры между пластинами 12, 19 и сканирующим элементом антенны 23, вектор поляризации электромагнитной волны, поддерживаемой в диэлектрической линии передачи 10 должен находиться в плоскости, параллельной плоскости пластин 12 и 19. Расстояние между пластинами 12, 19 и сканирующим антенным элементом 23 предпочтительно выбирать меньше половины длины волны передаваемого/принимаемого излучения в среде распространения [18].

Работа представленной антенны заключается в том, что при вращении барабана дифракционные решетки с периодами разной величины поочередно взаимодействуют с полем поверхностной волны ДВ 10. Это приводит к изменению в заданном секторе углов направления 13 распространения поверхностной волны гребневого ДВ 17 (рис. 8, *б*). Электромагнитная волна, распространяясь вдоль гребневого ДВ между поверхностями 16 и 21, согласно траектории 13, дифрагирует на периодических неоднородностях ДВ и излучается под углом Θ_m в двух противоположных направлениях, перпендикулярных направлению распространения 13.

Следует заметить, что изменением величины периода d гребневого ДВ можно управлять положением максимума излучения. Для подавления паразитного излучения, распространяющегося в направлении, противоположном траектории D , то есть той части объемной волны, которая проникает через диэлектрическую пластину 17, используется решетка из параллельных друг другу металлических отражающих полосок 20. Объемная волна будет иметь горизонтальную поляризацию P , параллельную оси металлических планарных элементов 20. При взаимодействии с рефлектором 5 объемная волна отражается в направлении R с поляризацией, перпендикулярной оси металлических полосок 20, как показано стрелкой PR на рис. 8, *а*. Далее, волна беспрепятственно излучается через плоскость гребневого ДВ в окружающее пространство. Путем целенаправленного изменения пространственного положения рефлектора 5 относительно направления 6 можно управлять величиной угла отражения и изменять траекторию распространения объемной волны, например с R на R' (рис. 8, *а*).

Таким образом, предложенная в работе [18] конструкция АДИ способна гарантировать сканирование ДН в азимутальной и угломестной плоскостях. Подобная конструкция также может быть использована в качестве облучателя цилиндрических линз или параболических отражателей.

В работе [16] представлены экспериментально апробированные АДИ с механическим способом сканирования ДН, разработанные для применения в автомобильных системах предотвращения столкновений (рис. 9). Антенные системы автомобильных радиовизоров предназначены для работы на частоте 76.5 ГГц с волнами линейной горизонтальной поляризации. АДИ 1 и 2 (рис. 9) отличаются количеством используемых в них ДР. Сканирование обеспечивается за счет механической коммутации ДР.



Рис. 9. АДИ с механическим способом сканирования ДН, содержащая: 1 – 40 ДР; 2 – 8 ДР

Режим сканирования для АДИ 1 является непрерывным, для АДИ 2 – пошаговым. Непрерывное сканирование в АДИ 1 реализовано за счет взаимного пересечения ДН от двух смежных ДР на уровне "минус" 0.3 дБ [19]. ДН в АДИ 2 имеют ширину 2° и характеризуются пространственным разнесением максимумов в 2° , что сопровождается незначительной интерференцией их полей и гарантирует величину УБЛ, равную "минус" 24 дБ.

Антенна 1 имеет компактную апертуру размером $120 \times 16 \text{ мм}^2$ и коэффициент усиления 31.6 дБ. Ширина ДН составляет $1 \times 18^\circ$, минимальный УБЛ равен "минус" 20 дБ и "минус" 18 дБ соответственно. Сектор сканирования в азимутальной плоскости составляет 30° , частота сканирования 25 Гц или 750°/с, шаг сканирования 0.75° . По заверению авторов [19], частоту сканирования ДН антенны, при необходимости, можно увеличить вплоть до 200 Гц. Представленные на рис. 9 антенны обеспечивают сканирование в широком секторе углов с высокой скоростью и разрешением, а также отвечают требованиям ГОСТ [7-9].

Таким образом, в работе представлен систематизированный обзор современного состояния техники АДИ, реализованных на основе открытых излучающих электродинамических структур, содержащих волноводы поверхностных волн и дифракционные решетки с периодом, соизмеримым с длиной излучаемой волны. Рассмотренные методом рефлексивного анализа антенны дифракционного излучения находят применение в современных радиоэлектронных системах связи, системах радиолокации, навигации и телевидения [13-18]. Уникальные электродинамические свойства рассмотренных конструкций антенн дают возможность использовать их при построении СВЧ - радиометрических рассеивающих комплексов для исследований экологической обстановки, а также скрытного наблюдения за объектами в интересах охранных служб. АДИ рассмотренного типа эффективно используются в активных локационных системах обзора поверхностей Земли с целью обнаружения и идентификации объектов [16]. Главными преимуществами, выгодно отличающими рассмотренный тип антенн от иных видов антенн СВЧ и КВЧ, являются, прежде всего, простота и надежность их конструкций, малые массогабаритные характеристики и низкие стоимостные показатели, высокая технологичность и масштабируемость при изготовлении. Последнее гарантирует возможность массового производства исследованных конструкций АДИ за счет высокой вероятности точного

воспроизведения размеров излучающего раскрыва и устройств возбуждения и, как следствие, повторяемости энергетических параметров и характеристик направленности.

Наиболее важное, перспективное и актуальное направление дальнейшего развития теории и техники антенн дифракционного излучения может быть основано на использовании свойств квазипериодических и неэквилидистантных дифракционных решеток [3,10,11,20-22]. Подобные решетки являются особым классом электродинамических сред, у которых в направлении распространения поверхностной волны изменяются как шаг расположения, так и параметры элементов (канавок в гребенчатой структуре, диафрагм в круглом волноводе, диэлектрической проницаемости слоев среды). Оптимальный выбор закономерностей продольного изменения геометрии и размеров элементов решетки, а также периода решетки может обеспечить относительно новые направленные и энергетические свойства АДИ либо существенным образом скорректировать характеристики АДИ, содержащих строго периодические решетки. При отказе от строгой эквидистантности ДР имеется полноценная возможность подавления побочных максимумов и бокового излучения в ДН, снижения угло-частотной чувствительности АДИ и реализации расширенной полосы частот при фиксированном направлении излучения, коррекции фазового распределения поля возбуждения на излучающем раскрыве. Одновременно с этим применение неравномерного в направлении распространения поверхностной волны профиля элементов ДР позволяет более гибко контролировать и управлять степенью связи ДВ и ДР, и тем самым, обеспечить реализацию требуемого амплитудного распределения поля на апертуре АДИ или (и) заданный входной импеданс АДИ.

Литература

1. Шестопалов, В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры [Текст] / В.П. Шестопалов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с.
2. Останков, А.В. Синтез излучающего гребенчатого раскрыва антенны вытекающей волны [Текст] / А.В. Останков // Радиотехника. – 2012. – № 2. – С. 38-44.
3. Останков, А.В. Дифракционная антенна вытекающей волны с нестандартной реализацией излучающего раскрыва [Текст] / А.В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 8. – С. 17-26.
4. Крюков, Д.Ю. Высокотехнологичная антенна вытекающей волны на основе дифракционной решетки с периодической гребенчатой структурой [Текст] / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 6. – С. 80-83.
5. А.с. 1072154 СССР, МКП Н01Q 3/26. Антенна бегущей волны [Текст] / Э.Ф. Зайцев, А.Н. Федотов // № 3472785-18-09; заявл. 16.07.82; опубл. 07.02.84, Бюл. № 5.
6. А.с. 1658248 СССР, МКП Н01Q 3/44. Антенна бегущей волны [Текст] / А.И. Климов, В.И. Юдин // № 4669499/09; заявл. 27.03.89; опубл. 23.06.91, Бюл. № 23.

7. ГОСТ Р 50736-95. Антенно-фидерные устройства систем сухопутной подвижной радиосвязи. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений [Текст]. – М., 1995. – 22 с.

8. ГОСТ Р 50867-96. Антенны радиорелейных линий связи. Классификация и общие технические требования [Текст]. – М., 1996. – 16 с.

9. ГОСТ Р 51798-2001. Решетки антенные многоходовые для оборудования систем подвижной радиосвязи. Основные параметры, общие технические требования, методы измерений [Текст]. – М., 2001. – 12 с.

10. Останков, А.В. Синтез гребенчатого полотна антенны вытекающей волны с заданным направлением излучения и максимальной эффективностью [Текст] / А.В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 5. – С. 157-161.

11. Останков, А.В. Электродинамические модели резонансных гребенчатых структур для анализа и синтеза высокоэффективных дифракционных антенн: дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук [Текст] / А.В. Останков. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – 415 с.

12. Хансен, Р.С. Фазированные антенные решетки [Текст] / Р.С. Хансен; пер. с англ. под ред. А.И. Синани. – М.: Техносфера, 2012. – 558 с.

13. Пат. 2432650 RU, МПК H01Q13/00. Плоская антенна с управляемой поляризационной характеристикой [Текст] / Ю.Б. Нечаев, А.И. Климов, А.В. Золотухин, М.Ю. Сидоров. № 2010110828/06; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.

14. Пат. 2435260 RU, МПК H01Q13/00. Плоская антенна [Текст] / Ю.Б. Нечаев, А.И. Климов, Н.С. Хохлов, В.И. Юдин, П.Н. Радько. № 2010100683/07; заявл. 11.01.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33.

15. Евдокимов, А.П. Планарная антенна дифракционного излучения КВЧ диапазона [Текст] / А.П. Евдоки-

мов, В.В. Крыжановский, Ю.К. Сиренко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 6. – С. 53-61.

16. Евдокимов, А.П. Антенны дифракционного излучения [Текст] / А.П. Евдокимов // Физические основы приборостроения. – 2013. – Т. 2, № 1. – С. 108-124.

17. Пат. 2449435 RU, МПК H01Q13/00, H01P5/12. Плоская антенная решетка дифракционного излучения и делитель мощности, используемый в ней [Текст] / Е.В. Петров, С.М. Кустов, М.С. Захаров. № 2011104303/07; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.

18. Pat. US 20120056794A1, H01Q13/20, H01P3/16. Planar dielectric waveguide with metal grid for antenna applications [Text] / V. Manasson, V. Khodos, L. Sadovnik, A. Avakian, V. Litvinov, D. Jia, M. Felman, M. Aretskin. Pub. Date: 08.03.2012.

19. Останков, А.В. Ретроспективный анализ возможностей, конструкций и основных характеристик дифракционных антенн вытекающей волны [Текст] / А.В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, №8. – С. 75-81.

20. Wang, D. A notched dielectric resonator antenna unit-cell for 60GHz passive repeater with endfire radiation [Text] / D. Wang, R. Gillard, R. Loison // European conference on antennas and propagation (EuCAP2014). 2014. – pp. 3167-3170.

21. Cho, Y.H. Metallic-rectangular-grooves based 2d reflectarray antenna excited by an open-ended parallel-plate waveguide [Text] / Y.H. Cho, W.J. Byun, M.S. Song // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58 (5). – pp. 650-656.

22. Huang, J. Reflectarray antennas [Text] / J. Huang, J.A. Encinar // IEEE Intl. Symp. Antennas Propagat. – New Jersey, 2008. – 216 p.

Воронежский государственный технический университет

REFLEXIVE ANALYSIS OF OPPORTUNITIES AND MAIN CONSTRUCTIVE AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF ANTENNAS OF DIFFRACTION RADIATION ON THE BASIS OF THE PERIODIC SLOWING DOWN STRUCTURES

D.Yu. Kryukov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kryukovdy@bk.ru

A.V. Ostankov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: avostankov@mail.ru

A review of the most famous and widely used types of antennas diffraction radiation, including a detailed description of electrodynamics characteristics of their functioning. In these antenna systems use a phenomenon of transformation of surface electromagnetic waves in a volume on periodic in homogeneities. For most of the described antenna are the basic structural and electrical parameters. It is found that the diffraction leaky wave antenna through the radiating transmission lines have a relatively high efficiency and small dimensions and weight characteristics. Another important advantage of the diffraction radiation of antennas is their mechanical and dielectric strength, which allows them to find use in radio systems operating in the complex mechanical and climatic conditions. Possible future directions for further improvement and modernization of the diffraction radiation antennas

Key words: antenna, periodic array, superficial wave, diffraction radiation

References

1. Shestopalov V.P. Physical Fundamentals of Millimeter and Submillimeter technology. T. 1. Open structures. – Kiev: Sciences. dumka, 1985. – 216 p.
2. Ostankov A.V. Sintez izluchayushchego grebenchatogo raskryva antenno vytekayushchey volny [Synthesis of Comb-Like Aperture of the Antenna Leaky Wave] // Radiotekhnika. – 2012. – № 2. – pp. 38-44.

3. Ostankov A.V. Difraktsionnaya antenna vytekayushchey volny s nestandartnoy realizatsiey izluchayushchego raskryva [The diffraction leaky-wave antenna with off-gauge implementation of the aperture] // Vestnik VSTU. – 2010. – T. 6, № 8. – pp. 17-26.
4. Kryukov D.Yu. Vysokotekhnologichnaya antenna vytekayushchey volny na osnove difraktsionnoy reshetki s periodicheskoy grebenchatoy strukturoy [Highly technological (hi-tech) antenna leaky wave diffraction grating with a periodic comb] // Vestnik VSTU. – 2015. – T. 11, № 6. – pp. 80-83.
5. A. s. 1072154 SSSR, MKP H01Q 3/26. Antenna begushchey volny [Traveling-wave antenna] / E.F. Zaytsev, A.N. Fedotov // № 3472785-18-09; zayavl. 16.07.82; opubl. 07.02.84, Byul. № 5.
6. A. s. 1658248 SSSR, MKP H01Q 3/44. Antenna begushchey volny [Traveling-wave antenna] / A.I. Klimov, V.I. Yudin // № 4669499/09; zayavl. 27.03.89; opubl. 23.06.91, Byul. № 23.
7. GOST R 50736-95. Antennno-fidernye ustroystva sistem sukhoputnoy podvizhnoy radiosvyazi. Tipy, osnovnye parametry, tekhnicheskie trebovaniya i metody izmereniy [Antenna-feeder devices of systems of land mobility-term radio. Types, basic parameters, technical requirements and methods of measurement]. – M., 1995. – 22 p.
8. GOST R 50867-96. Antenny radioreleynykh liniy svyazi. Klassifikatsiya i obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Antennas radio relay lines. Classification and general technical requirements]. – M., 1996. – 16 p.
9. GOST R 51798-2001. Reshetki antennoye mnogovkhodovye dlya oborudovaniya sistem podvizhnoy radiosvyazi. Osnovnye parametry, obshchie tekhnicheskie trebovaniya, metody izmereniy [Antenna array for multi-input equipment mobile radio systems. Basic parameters, general technical requirements, methods of measurement]. – M., 2001. – 12 p.
10. Ostankov A.V. Sintez grebenchatogo polotna antennoy vytekayushchey volny s zadannym napravleniem izlucheniya i maksimal'noy effektivnost'yu [Synthesis of comb antenna aperture of the leaky wave with a given direction of radiation and of maximum efficiency] // Vestnik VSTU. – 2011. – T. 7, № 5. – pp. 157-161.
11. Ostankov A.V. Elektrodinamicheskie modeli rezonansnykh grebenchatykh struktur dlya analiza i sinteza vysokoeffektivnykh difraktsionnykh anten [Electrodynamic model of resonance comb structure for analysis and synthesis of diffractive antenna highly]: diss. na soisk. uch. st. d-ra tekhn. nauk. – Voronezh: VSTU, 2011. – 415 p.
12. Khansen R.S. Fazirovannyye antennoye reshetki [Phased array antennas] / Per. s angl. pod red. A.I. Sinani. – M.: Tekhnosfera, 2012. – 558 p.
13. Pat. 2432650 RU, MPK H01Q13/00. Ploskaya antenna s upravlyaemoy polarizatsionnoy kharakteristikoy [Plane antenna with controlled polarization characteristic] / Yu.B. Nechaev, A.I. Klimov, A.V. Zolotukhin, M.Yu. Sidorov. № 2010110828/06; zayavl. 22.03.2010; opubl. 27.10.2011, Byul. № 30.
14. Pat. 2435260 RU, MPK H01Q13/00. Ploskaya antenna [Plane antenna] / Yu.B. Nechaev, A.I. Klimov, N.S. Khokhlov, V.I. Yudin, P.N. Rad'ko. № 2010100683/07; zayavl. 11.01.2010; opubl. 27.11.2011, Byul. № 33.
15. Evdokimov A.P., Kryzhanovskiy V.V., Sirenko Yu.K. Planarnaya antenna difraktsionnogo izlucheniya KVCh diapazona [A planar extremely high frequency diffraction radiation antenna] // Electromagnetic Waves and Electronic Systems. – 2011. – T. 16, № 6. – pp. 53-61.
16. Evdokimov, A.P. Antenny difraktsionnogo izlucheniya [Diffraction radiation antennas] // Physical Bases of Instrumentation. – 2013. – T. 2, № 1. – pp. 108-124.
17. Pat. 2449435 RU, MPK H01Q13/00, H01P5/12. Ploskaya antennaya reshetka difraktsionnogo izlucheniya i delitel' moshchnosti, ispol'zuemyy v ney [Planar array and diffraction radiation power divider used therein] / E.V. Petrov, S.M. Kustov, M.S. Zakharov. № 2011104303/07; zayavl. 07.02.2011; opubl. 27.04.2012, Byul. № 12.
18. Pat. US 20120056794A1, H01Q13/20, H01P3/16. Planar dielectric waveguide with metal grid for antenna applications / V. Manasson, V. Khodos, L. Sadovnik, A. Avakian, V. Litvinov, D. Jia, M. Felman, M. Aretskin. Pub. Date: 08.03.2012.
19. Ostankov A.V. Retrospektivnyy analiz vozmozhnostey, konstruksiy i osnovnykh kharakteristik difraktsionnykh anten vytekayushchey volny [The retrospective analysis of possibilities, designs and the basic characteristics of the diffraction antennas leaky wave] // Vestnik VSTU. – 2010. – T. 6, №8. – pp. 75-81.
20. D. Wang, R. Gillard, R. Loison. A notched dielectric resonator antenna unit-cell for 60GHz passive repeater with endfire radiation // European conference on antennas and propagation (EuCAP2014). –2014. – pp. 3167-3170.
21. Y. H. Cho, W. J. Byun, M. S. Song. Metallic-rectangular-grooves based 2d reflectarray antenna excited by an open-ended parallel-plate waveguide // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58 (5). – pp. 650-656.
22. J. Huang, J. A. Encinar. Reflectarray antennas // IEEE Intl. Symp. Antennas Propagat. – New Jersey, 2008. – 216 p.

ЗАДАЧА ЛЯПУНОВА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ КОНТУРУ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кривцов

Обычно применяемые в радиофизике и электронике методы анализа устойчивости электро- и радиоцепей (Рауса-Гурвица, Михайлова, Найквиста) не охватывают цепи с явно зависящими от времени параметрами (параметрические цепи). В таких случаях целесообразно применять теорию устойчивости Ляпунова, которая по каким-то причинам не получила должного распространения в радиотехнических дисциплинах. Среди параметрических радиоцепей на практике получил наибольшее распространение параметрический контур, проблема устойчивости которого является сложной теоретической задачей. Её математической основой могут быть относительно малоизвестные работы Ляпунова, посвященные специальной задаче устойчивости усеченного линейного дифференциального уравнения второго порядка с периодическим коэффициентом.

Ниже предлагается на этой основе метод анализа частного, но характерного случая параметрического контура. Метод может быть обобщен на более сложные параметрические цепи. Обычно подобные задачи связаны с громоздкими преобразованиями. В настоящее время они могут быть преодолены с помощью компьютеров. Анализ устойчивости реальных физических объектов позволяет привлечь физический смысл и тем самым преодолеть некоторые трудности при соответствующем анализе абстрактных математических уравнений

Ключевые слова: параметрический контур с периодическими параметрами, устойчивость по Ляпунову, константа Ляпунова, приведение задачи об устойчивости контура к задаче Ляпунова

Введение

В настоящее время имеет место электронизация общества: электроникой насыщаются хозяйственные предприятия, культурные учреждения, спортивные комплексы, частные квартиры. Используемые электронные системы имеют тенденцию к усложнению, при этом удельный вес нелинейных устройств связан с большими трудностями, но во многих случаях достаточно рассмотреть линейные приближения. При анализе нелинейного колебательного контура в линейном приближении задача может быть приведена либо к анализу контура с постоянными параметрами, либо к анализу линейного контура с переменными параметрами. Первый случай достаточно разработан, второй оказывается намного сложнее. Главное отличие параметрического контура от обычного заключается в том, что параметрический контур с положительными элементами может быть неустойчив по Ляпунову, т. е. его свободный процесс может быть не затухающим, как в обычном контуре, а беспредельно возрастающим. Анализ устойчивости параметрического контура может быть приведен к относительно малоизвестной задаче Ляпунова, специально посвященной анализу устойчивости усеченного линейного однородного

дифференциального уравнения с периодическим коэффициентом.

Ниже рассмотрена техническая задача устойчивости параметрического контура с использованием упомянутой математической задачи Ляпунова.

Математическая модель параметрического контура

Многие задачи радиоэлектроники связаны с анализом свободных колебаний параметрического контура, схема которого представлена на рис. 1.

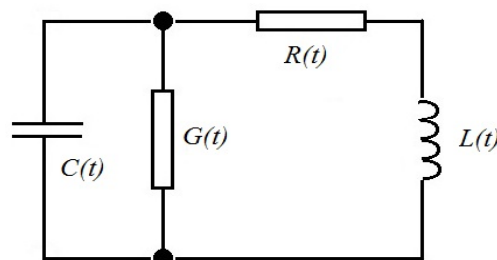


Рис. 1. Схема анализируемого параметрического контура

Математических моделей такого контура может быть сколько угодно в зависимости от того, какие две функции выбраны в качестве определяющих. Практика показывает, что в качестве таковых желательно выбирать заряд конденсатора $q(t)$ и потокосцепление индуктивности $\Phi(t)$. Тогда система уравнений параметрического контура оказывается максимально приближенной к аналогичной системе обычного контура.

Бирюк Николай Данилович – ВГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: lidia@vmail.ru
Кривцов Алексей Юрьевич – АО «Концерн «Созвездие», инженер; ВГУ, аспирант, e-mail: ukrgorg@rambler.ru

Первый и второй законы Кирхгофа приводят к следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = -\frac{G}{C}q - \frac{1}{C}\Phi \\ \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{C}q - \frac{R}{L}\Phi \end{cases}$$

Это – линейная однородная система двух дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами. Считается, что все параметры контура положительны и изменяются во времени по любым непрерывным функциям $C(t)$, $G(t)$, $R(t)$, $L(t)$. В данном случае функции являются периодическими с одним и тем же периодом. Наша задача связана с громоздкими преобразованиями, для этого полученная дифференциальная система с переменными коэффициентами разных размерностей неудобна. Ее целесообразно нормировать. С этой целью введем масштабные постоянные делители времени t_M , заряда q_M и магнитного потока Φ_M и перейдем к безразмерным

переменным $\tau = \frac{t}{t_M}$, $x_1 = \frac{q}{q_M}$, $x_2 = \frac{\Phi}{\Phi_M}$. В

новых переменных дифференциальная система примет вид

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = -\frac{t_M G}{C}x_1 - \frac{t_M r}{L}x_2 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = \frac{t_M}{rC}x_1 - \frac{t_M R}{L}x_2 \end{cases},$$

где $r = \frac{\Phi_M}{q_M}$ – нормирующее сопротивление.

Подбирая произвольно r и t_M систему можно привести к максимально удобному виду. Представим ее в менее громоздком виде

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = a_{21}x_1 - a_{22}x_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $a_{11} = \frac{t_M G}{C}$, $a_{12} = \frac{t_M r}{L}$, $a_{21} = \frac{t_M}{rC}$, $a_{22} = \frac{t_M R}{L}$.

Это непрерывные периодические положительные функции с одним и тем же периодом T . Подбором масштабного делителя t_M этот период можно сделать определенным, например, $T = 2\pi$.

Систему (1) можно преобразовать в одно дифференциальное уравнение второго

порядка. Таких уравнений два, относительно x_1 и x_2 :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_1}{d\tau^2} + a_1 \frac{dx_1}{d\tau} + b_1 x_1 &= 0, \\ \frac{d^2 x_2}{d\tau^2} + a_2 \frac{dx_2}{d\tau} + b_2 x_2 &= 0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} a_1 &= a_{11} + a_{22} - \frac{d}{d\tau} \ln a_{12}, \\ b_1 &= \frac{1}{a_{11}} \left(a_{22} + \frac{a_{12} a_{21}}{a_{11}} + \frac{d}{d\tau} \ln \frac{a_{11}}{a_{12}} \right); \\ a_2 &= a_{11} + a_{22} - \frac{d}{d\tau} \ln a_{21}, \\ b_2 &= \frac{1}{a_{22}} \left(a_{11} + \frac{a_{12} a_{21}}{a_{22}} + \frac{d}{d\tau} \ln \frac{a_{22}}{a_{21}} \right). \end{aligned}$$

Эти два уравнения равнозначны по свойству устойчивости, т. е. если одно из них устойчиво или неустойчиво по Ляпунову, то и другое будет таким же. Поэтому ограничимся рассмотрением первого из них.

Это уравнение неустойчиво по Ляпунову, если среди его решений найдутся такие, у которых модули при некоторых достаточно больших значениях аргумента τ могут превышать любое наперед заданное положительное число. Если таких решений нет, то уравнение устойчиво по Ляпунову. Если, кроме этого, все решения стремятся к нулю при безграничном возрастании аргумента τ , то уравнение асимптотически устойчиво по Ляпунову. Эти понятия можно отнести не только к дифференциальным уравнениям, но и непосредственно к контуру. Контур неустойчив, если его свободный процесс при некоторых начальных значениях может быть безгранично возрастающим. Если этого нет, то контур устойчив. Если, кроме этого, свободный процесс с течением времени стремится к нулю, то контур асимптотически устойчив. Например, обычный колебательный контур с омическими потерями асимптотически устойчив, т. к. любой свободный процесс в нем – экспоненциально убывающий. Такой же контур без омических потерь – устойчив (не асимптотически). Обычный контур с положительными параметрами не может быть неустойчивым. Параметрический контур такого же типа может быть, как устойчивым, так и неустойчивым. В радиоэлектронике очень важно иметь гарантию, что контур либо устойчив (в усилителях), либо неустойчив (в

автогенераторах). Анализ устойчивости параметрического контура является весьма сложной задачей.

В теории дифференциальных уравнений [1] рекомендуется уравнения типа (1) приводить к нормальному (каноническому) виду, т. е. устранять первую производную.

К первому уравнению (1) применим замену переменной

$$x_1 = y_1 e^{-\frac{1}{2} \int a_1 d\tau},$$

тогда получим

$$\frac{d^2 y_1}{d\tau^2} + c_1 y_1 = 0. \quad (2)$$

где $c_1 = c_1(\tau)$ – непрерывная периодическая

функция $c_1 = b_1 - \frac{1}{4} a_1^2 - \frac{1}{2} \frac{da_1}{d\tau}$.

Аналогично, можно заменой переменной

$$x_2 = y_2 e^{-\frac{1}{2} \int a_2 d\tau},$$

Привести и второе уравнение (1) к виду

$$\frac{d^2 y_2}{d\tau^2} + c_2 y_2 = 0, \quad (3)$$

где $c_2 = b_2 - \frac{1}{4} a_2^2 - \frac{1}{2} \frac{da_2}{d\tau}$.

Эта задача Ляпунова в настоящее время в естествознании применяется намного реже, чем его основной труд [2], а в радиоэлектронике даже основной труд в силу каких то случайных традиций используется незаслуженно редко.

Ляпунов предложил метод анализа устойчивости уравнения

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + p(t)x = 0, \quad (4)$$

где $p(t)$ – непрерывная периодическая функция, ее период обозначим через T , тогда $p(t+T)=p(t)$. Требуется определить, является ли это уравнение устойчивым или неустойчивым. Общий случай знакопеременной функции $p(t)$ не рассматривался. Доказано, что если $p(t) \leq 0$, то уравнение (4) неустойчиво. Случай $p(t) \geq 0$ по Ляпунову является основным, ему посвящены статьи [3-8].

Метод Ляпунова начинается с отыскания фундаментальной системы решений уравнения (4). Она состоит из двух линейно независимых решений $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Очевидно, что существует бесконечное множество фундаментальных систем решений.

Предлагается выбрать особую фундаментальную систему решений с начальными условиями:

для $x_1(t)$: $x_1(0)=1, \dot{x}_1(0)=0$; для $x_2(t)$: $x_2(0)=0, \dot{x}_2(0)=1$.

Здесь точка сверху означает дифференцирование по t . Если такая фундаментальная система решений построена, то требуется найти характеристическую константу, позже названную константой Ляпунова

$$A = \frac{1}{2} [x_1(T) + \dot{x}_2(T)]. \quad (5)$$

Доказано, что если $|A| < 1$, то уравнение

(4) устойчиво, если $|A| > 1$, то неустойчиво.

Случай $|A| = 1$ является особым и не может быть обнаружен приближенными методами. С точки зрения радиоэлектронных задач этот случай чрезвычайно редкий, поэтому здесь не рассматривается.

Характерный частный случай задачи Ляпунова

Дифференциальное уравнение типа (4) в современной литературе известно как уравнение Хилла. Рассмотрим максимально упрощенное уравнение Хилла

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + p(t)x = 0, \quad (7)$$

где $p(t) = M$ при $t \in [0, T_1]$; $p(t) = N$ при $t \in [T_1, T]$. Здесь T – период функции $p(t)$; M, N, T_1 – положительные константы, $T_1 < T$. На рис. 2 показан вид функции $p(t)$.

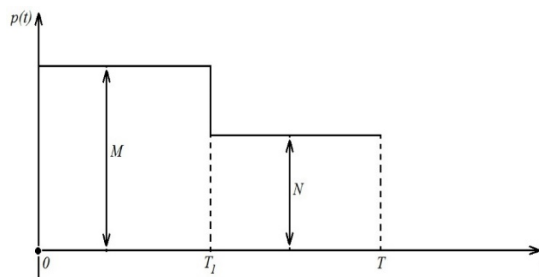


Рис. 2. Кусочно-постоянная функция $p(t)$

В данном случае константа Ляпунова может быть получена непосредственно. Для этого сначала находится фундаментальная система решений, в состав которой входит два решения $x_1(t)$ и $x_2(t)$ с начальными условиями:

для $x_1(t)$: $x_1(0)=1, \dot{x}_1(0)=0$; для $x_2(t)$: $x_2(0)=0, \dot{x}_2(0)=1$. Если эти решения найдены, то при $t=T$ фиксируются значения $x_1(T)$ и $\dot{x}_2(T)$. Затем находится константа Ляпунова

$$A = \frac{1}{2} [x_1(T) + \dot{x}_2(T)]. \quad (8)$$

При $|A| < 1$ уравнение (8) устойчиво, при $|A| > 1$ – неустойчиво. Заметим, что для линейных уравнений понятия «устойчивость» и «ограниченность решений на полубесконечном интервале $[0, \infty]$ для t » совпадают.

Решение $x_1(t)$ находится достаточно просто: в интервале $[0, T_1]$ это – дифференциальное уравнение с постоянным коэффициентом. При начальных условиях $x_1(0)=1, \dot{x}_1(0)=0$ решение однозначно. В конце интервала $t=T_1$ значение этого решения $x_1(T_1)$ и его производной $\dot{x}_1(T_1)$ являются начальными значениями для решения этого же уравнения в следующем интервале $[T_1, T]$. Таким образом находится решение $x_1(t)$ в интервале времени $[0, T]$, длина которого равна периоду.

Точно так же находится и решение $x_2(t)$ при других начальных значениях $x_2(0)=0, \dot{x}_2(0)=1$.

В данном случае эти решения следующие:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \cos(\sqrt{M}t)_{t \in [0, T_1]} + \\ &+ X_m^{(1)} \cos(\sqrt{N}t + \varphi^{(1)})_{t \in [T_1, T]}, \\ x_2(t) &= \frac{1}{\sqrt{M}} \sin(\sqrt{M}t)_{t \in [0, T_1]} + \\ &+ X_m^{(2)} \sin(\sqrt{N}t + \varphi^{(2)})_{t \in [T_1, T]}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)} &= \arctg \left[\sqrt{\frac{M}{N}} \operatorname{tg}(\sqrt{M}T_1) \right] - \sqrt{M}T_1, \\ X_m^{(1)} &= \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{\sin(\sqrt{M}T_1)}{\sin(\sqrt{N}T_1 + \varphi^{(1)})}, \\ \varphi^{(2)} &= \arctg \left[\sqrt{\frac{N}{M}} \operatorname{tg}(\sqrt{M}T_1) \right] - \sqrt{M}T_1, \\ X_m^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{\sin(\sqrt{M}T_1)}{\sin(\sqrt{N}T_1 + \varphi^{(2)})}. \end{aligned}$$

Значения этих решений в конце периода ($t=T$):

$$X_1(T) = X_m^{(1)} \cos(\sqrt{N}T + \varphi^{(1)}),$$

$$X_2(T) = X_m^{(2)} \sin(\sqrt{N}T + \varphi^{(2)}).$$

Для вычисления константы Ляпунова требуется значение производной второго решения в конце периода:

$$\dot{X}_2(T) = \sqrt{N} X_m^{(2)} \cos(\sqrt{N}T + \varphi^{(2)}).$$

Теперь константа Ляпунова легко находится

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2} [X_1(T) + \dot{X}_2(T)] = \\ &= \frac{1}{2} \left[X_m^{(1)} \cos(\sqrt{N}T + \varphi^{(1)}) + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{N} X_m^{(2)} \cos(\sqrt{N}T + \varphi^{(2)}) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Если период T заранее известен, то константа Ляпунова A зависит от трех параметров M, N и T_1 . Поэтому имеет место большое разнообразие результатов, которые можно сгруппировать в три варианта: $A < 1$, $A = 1$, $A > 1$, характерных для устойчивости или неустойчивости уравнения (7). Рассмотренный частный случай имеет значение и для общего случая функции $p(t)$.

Известен [9] случай решения уравнения (7), опирающийся на рассмотренную только что частную задачу. Именно, период T разбивается на конечное число n равных или неравных подынтервалов. В пределах каждого подынтервала функция $p(t)$ считается константой, равной любому значению этой функции в этом подынтервале. Поскольку начальные условия заданы, то можно найти решение в первом подынтервале. Значение этого решения в конце первого подынтервала задает начальные условия для второго подынтервала, что позволяет найти решение во втором подынтервале и т. д., таким образом решение доводится до конца периода $t=T$. Это – приближенный метод решения, доказано, что полученное таким способом решение сходится [9], можно численно оценить погрешность решения. Недостаток этого метода в его громоздкости. Однако, в настоящее время эта громоздкость преодолевается с помощью компьютерных вычислений. Например, можно период T разбить на 1000 подынтервалов и получить практически точное решение, что было недостижимо во времена Ляпунова.

Развития данного метода Ляпунова в разных направлениях приведены, например, обстоятельной монографии [10]. Все они связаны с усложнением и громоздкими вычислениями. Параметрический контур представляет собой простое по структуре

звено параметрических цепей, которые применяются в радиоэлектронике и, кроме того, довольно часто возникают как нежелательные (паразитные) явления. Самые распространенные параметрические цепи рассмотрены и систематизированы в монографии [11], где приведены также соображения об их устойчивости. На наш взгляд, удобных в применении инженерных методов анализа устойчивости параметрических радиоцепей пока не существует.

Анализ устойчивости абстрактного уравнения (4) целиком переносится на уравнения (2) и (3), связанные с параметрическим контуром. Тот факт, что в уравнении (4) используется обычное, а в (2) и (3) – нормированное время принципиального значения не имеет. Нормировка позволяет привести конкретную задачу к максимально удобному для анализа виду.

Заключение

Оценим соответствие между устойчивостью уравнений (2) и (3) и устойчивостью параметрического контура. Равнозначности между уравнением (2) и параметрическим контуром в общем случае нет. Именно, если уравнение (2) устойчиво, то и параметрический контур устойчив. Если это уравнение неустойчиво, то это не всегда влечет за собой неустойчивость контура, поскольку тепловые потери в $G(t)$ и $R(t)$ стабилизируют контур. Если степень стабилизации достаточно большая, то контур может быть устойчив при неустойчивости уравнения (2). В частном случае $G(t) \equiv 0$, $R(t) \equiv 0$ будет иметь место соответствие по устойчивости между уравнением (2) и параметрическим контуром.

Очевидно, что при очень малых потерях, а именно этот случай наиболее интересен в радиоэлектронике, можно приближенно полагать, что при неустойчивости уравнения

(2) и параметрический контур будет неустойчив, поскольку стабилизирующее действие диссипации будет мало.

Литература

1. Зайцев, В. Ф. Справочник по линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. - М.: Факториал, 1997. – 304с.
2. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А. М. Ляпунов. - Собрание сочинений. Т.2. – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С.7-263.
3. Ляпунов, А. М. Об одном вопросе, касающемся линейных дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С. 332-386.
4. Ляпунов, А. М. Об одном ряде, встречающемся в теории линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – с. 387-391.
5. Ляпунов, А. М. Об одном линейном дифференциальном уравнении второго порядка [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С. 401-403.
6. Ляпунов, А. М. Об одном трансцендентном уравнении и линейных дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С. 404-406.
7. Ляпунов, А. М. Об одном ряде, относящемся к теории линейных дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С. 407-409.
8. Ляпунов, А. М. Об одном ряде, встречающемся в теории линейных дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами [Текст] / А. М. Ляпунов. – Собрание сочинений. Т.2 – Изд. АН СССР: М.-Л., 1956. – С. 410-472.
9. Демидович, Б. П. Лекции по математической теории устойчивости [Текст] / Б. П. Демидович. – М.: Наука, 1967. – 472с.
10. Якубович, В. А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения [Текст] / В. А. Якубович, В. М. Старжинский. - М.: Наука, 1972.-718с.
11. Бирюк, Н. Д. Основы теории параметрических радиоцепей [Текст] / Н. Д. Бирюк, В. В. Юргелас. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2012. – 345с.

Воронежский государственный университет
АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж)

LYAPUNOV'S PROBLEM CONFORMABLY TO TIME VARYING CIRCUIT WITH PERIODICAL PARAMETERS

N.D. Birjuk, Doctor of Physico-mathematical Sciences, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lidia@vmail.ru

A.Yu. Krivtsov, engineer, JSC "Concern "Sozvezdie", graduate, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ukrorg@rambler.ru

In general use methods of analysis of electrical and radio circuits stability (of Routh-Gurwits, Mikhaylov, Naykwist) do not include circuits with evidently dependent in on time parameters (time varying circuits). In that cases it is expediently to use Lyapunov's theory of stability, which for unknown reason did not proper dissemination in radio engineering. Time varying circuit the most uses in practice among other time varying circuits. Analysis its stability is complicated theoretical problem. Its mathematical basis are relatively little known Lyapunov's publications dedicated to special stability problem of truncated linear differential equation of the second order with periodical coefficients.

Below it is proposed on this basis method of analysis of particular, but characteristical case of time varying circuit. The method may be generalized to more complicated time varying circuits. In general use similar problems are bound up with unwieldy transformers. In this time it may be accomplished with the help of computer. Stability analysis of the real physical objects allows to attract physical sense and to overcome some difficulties of analysis of abstract mathematical equations

Key words: time varying circuit with periodical parameters, stability about Lyapunov, Lyapunov's constant, reduction of time varying circuit stability problem to Lyapunov's problem

References

1. Zaytsev V. F., Polyanin A. D. Spravochnik po linejnym obyknovennym differencial'nym uravnenijam [Reference book about linear ordinary differential equations]. M.: Factorial, 1997. – 304 p.
2. Lyapunov A. M. Obshhaja zadacha ob ustojchivosti dvizhenija [General problem about stability of motion]. – Collected works.-T.2.-Edition of academy sciences of USSR.-M.-L,1956.-p.7-263.
3. Lyapunov A. M. Ob odnom voprose, kasajushhemsja linejnyh differencial'nyh uravnenij vtorogo porjadka s periodicheskimi koeficientami [About one problem, concerning with linear differential equations of the second order with periodical coefficients]. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.332-386.
4. Lyapunov A. M. Ob odnom rjade, vstrechajushhemsja v teorii linejnyh differencial'nyh uravnenij s periodicheskimi koeficientami [About one a series being met with theory of linear differential equations with periodical coefficients]. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.386-391.
5. Lyapunov A. M. Ob odnom linejnom differencial'nom uravnenij vtorogo porjadka About one differential equation of the second series. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.401-403.
6. Lyapunov A. M. Ob odnom transcendentnom uravnenii i linejnyh differencial'nyh uravnenij vtorogo porjadka s periodicheskimi koeficientami [About one transcendental equation of linear differential equations of the second series with periodical coefficients]. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.404-406.
7. Lyapunov A. M. Ob odnom rjade, odnosjashhemsja k teorii linejnyh differencial'nyh uravnenij vtorogo porjadka s periodicheskimi koeficientami About one series, concerning to theory of linear differential equations of the second order with periodical coefficients. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.407-409.
8. Lyapunov A. M. Ob odnom rjade, vstrechajushhemsja v teorii linejnyh differencial'nyh uravnenij vtorogo porjadka s periodicheskimi koeficientami [About one series, being met in theory of linear differential equations of the second order with periodical coefficients]. - Collected works.-T.2.-Edition of ASUSSR.-M.-L,1956.-p.410-472.
9. Demidovich B. P. Lekcii po matematicheskoj teorii ustojchivosti [Lectures on the mathematical theory of stability]. – M.: Izd. MGU CheRo, 1967.- 472 p.
10. Yakubovich V. A., Starzhinskiy V. M. Linejnye differencial'nye uravnenija s periodicheskimi koeficientami i ih prilozhenija [Linear differential equations with periodic coefficients and their applications]. - M.: Nauka, 1972.-718 p.
11. Birjuk N. D., Yurgelas V. V. Osnovy teorii parametriceskih radiocepej [The basis of time varying radio circuit theory]. – Voronezh: Publishing and polygraphic centre of VSU, 2012.-345p.

ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА

В.В. Золотарев, В.П. Смоленцев

В работе приведены исследования по увеличению толщины деталей, разрезаемых электродом-проволокой (ЭП) на электроэрозионном оборудовании и станках для комбинированной обработки. Для этого установлены закономерности механизма формирования низкочастотных автоколебаний проволоки в пазе и показаны условия, при которых такие перемещения инструмента могут быть ограничены или полностью исключены. Решена сложная проблема по созданию нового (на уровне изобретения) способа стабилизации процесса перемещения ЭП внутри паза большой длины. Здесь актуальным направлением работ в текущий период времени становится разработка оборудования и технологии, основанных на новых способах и устройствах, защищенных охранными документами. Для реализации созданного способа потребовалось создать методику расчета параметров процесса с учетом автоколебаний инструмента. Были научно обоснованы и определены границы по толщине обрабатываемого участка детали, где стабилизации процесса можно достичь путем натяжения ЭП и увеличения скорости ее перемотки. Однако такое решение позволяет охватить только часть номенклатуры деталей, где процесс обработки ЭП имеет несомненные преимущества. Приведенные материалы позволяют сформировать базу для расширения области использования новых технологических процессов в машиностроении и обеспечения конкурентоспособности создаваемых в этой области технических средств для электрических методов обработки.

Приведенные материалы использованы при создании перспективных изделий в авиакосмической отрасли, где электрические методы обработки наиболее актуальны и открывают возможность проектирования перспективных наукоемких изделий, изготовление которых традиционными методами невозможно или экономически неэффективно. Кроме того, приведенные результаты развивают технологию изготовления уникальных базовых деталей и узлов создаваемой продукции в различных областях машиностроения

Ключевые слова: проволочный электрод, автоколебания, толщина детали, стабилизация, параметры процесса

Введение

Известно, что с увеличением толщины заготовок постоянно снижается точность размеров и положение паза. Все попытки стабилизировать процесс за счет создания системы внешних опор и упругих элементов являются недостаточными для обеспечения точности обработки и стабилизации процесса разделения деталей повышенной толщины и сложности. Основной причиной нестабильности являются колебания электрода-проволоки (ЭП) в пазах, которые переходят в автоколебательный процесс, вызывающий появление местных дефектов типа врезок и в ряде случаев - брак деталей. Для расширения области использования ЭП на обработку деталей большой толщины требуются новые технологические и конструкторские приемы для управления положением проволочного электрода внутри разрезаемого паза, что позволяет стабилизировать процесс изготовления деталей.

Механизм формирования низкочастотных автоколебаний ЭП в пазах

Эксперименты, выполненные для различных диаметров ЭП, показали, что частота колебаний инструмента в пазах при большой толщине участка детали близка к частоте, установленной в [1; 2; 3; 4] для механической обработки. Если не принимать во внимание изменение массы m участка проволоки

между опорами ЭП (близкого к толщине детали H) и износ инструмента, то можно амплитуду колебаний от начального положения оси проволоки принять как Δl_n (рис. 1).

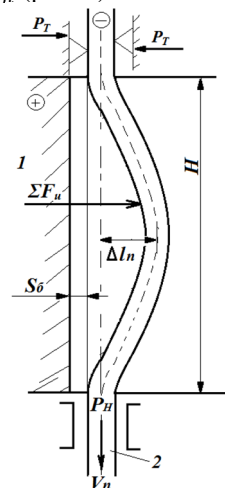


Рис. 1. Воздействие сил импульсов на проволочный электрод-инструмент (2) при обработке детали (1): H – толщина зоны обработки; P_m – сила торможения движению проволоки на входе; P_n – сила натяжения проволоки (2) диаметром d_n ; V_n – скорость перемотки проволоки; ΣF_u – суммарная приведенная сила воздействия на проволочный электрод-инструмент (2) импульсами разрядов при теоретически возможном наибольшем количестве импульсов; S_δ – боковой межэлектродный зазор; Δl_n – прогиб ЭП

По [1]

$$\Delta l_n = A_0 \cdot e^{(q-n)\tau}, \quad (1)$$

Золотарев Владимир Викторович – ВГТУ, аспирант,
e-mail: Z.V.V.220975@mail.ru
Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук,
профессор, e-mail: vsmolen@inbox.ru

где A_0 - амплитуда колебаний проволоки при разделении деталей малой толщины (для диаметра проволоки 0,2 мм толщина, как правило, менее 80 мм), где A_0 меньше S_{δ} . Хотя амплитуда колебаний при большой толщине приравнена к Δl_n , но размах проволоки в сторону обработки ограничен S_{δ} , что влияет на амплитуду Δl_n и снижает ее расчетное значение.

q - показатель возбуждаемых колебаний.

$$q = \sqrt{\frac{\bar{l} - \bar{p}}{2m}}, \quad (2)$$

где $\bar{l} = \frac{H}{H_0}$ - отношение толщины обрабатываемого участка к толщине детали при устойчивом процессе обработки (обычно при расчетах за H_0 принимают 80-100 мм при $d_n=0,25$ мм и $H_0=120-150$ мм при $d_n=0,3$ мм).

$\bar{p} = \frac{c}{c_0}$, где $\frac{c}{c_0}$ - отношение жесткости системы подачи ЭП при толщине обрабатываемой детали к жесткости системы при устойчивом процессе при толщинах детали, приведенных для $\bar{l}$;

m - масса участка проволоки между опорами;

τ - время периода колебаний T .

Степень ослабления автоколебательного (как правило, резонансного) процесса характеризуется логарифмическим декрементом D затухания колебаний.

Тогда закон изменения положения проволоки при автоколебательном процессе $\Delta l'_n$ может быть представлен зависимостью [3;4]

$$\Delta l'_n = k_T \cdot A_0 \cdot e^{q(1-\frac{D}{qT})\tau} \quad (3)$$

где k_T - коэффициент торможения проволоки при соприкосновении с разрезаемой поверхностью детали при ее колебании в пазах, что влияет на амплитуду перемещения проволоки в обратную сторону. Величина k_T зависит не только от $\frac{H}{H_0}$ и $\frac{c}{c_0}$, но и вязкости рабочей среды в пазе, режимов обработки. k_T может изменяться в широких пределах до 1.

Период T автоколебаний зависит от жесткости системы (C) перемещения натянутой проволоки между опорами

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\Sigma F_u / \Delta l_n}} \quad (4)$$

Критерием возникновения автоколебательного процесса является

$$q = \frac{D}{T} \quad (5)$$

Если $q < n$, то автоколебания (в том числе резонансные) не возникают. Здесь n - коэффициент сопротивления среды.

При $q > n$ - автоколебания формируются, и тем интенсивнее, чем больше превышение q над n .

Границу начала автоколебательного процесса можно найти из (1), приняв отклонение проволоки на границе устойчивости процесса как $\Delta l_n = A_0$. Тогда логарифмический показатель J возбуждения автоколебаний составит

$$J = q \frac{\mu}{\mu_0} T = 0 \quad (6)$$

где μ - коэффициент трения проволоки о рабочую среду при автоколебательном процессе в предположении, что при отскоке проволока движется без касания боковых стенок паза. Это возможно только при однокоординатном ее перемещении в пазе;

μ_0 - коэффициент трения при стабильном процессе обработки.

С учетом (3), (4) получаем уравнение в неявном виде для вычисления критического значения толщины детали, после чего требуется использовать предложенные в работе способ и устройство [5;6;7] для стабилизации положения проволоки в пазе

$$\frac{\mu}{\mu_0} \sqrt{\frac{2 \left(\sqrt{\frac{H}{H_0} - \frac{c}{c_0}} \right)}{\pi d_n^2 \gamma_M H}} \cdot 2\pi \sqrt{\frac{\Delta l_n \gamma_M \pi d_n^2 H}{4 \Sigma F_u}} = 0 \quad (7)$$

где γ_M - удельная плотность материала проволоки; $\frac{\mu}{\mu_0}$ - отношение коэффициентов трения при автоколебательном процессе и при стабильной обработке.

Величины μ и μ_0 изменяют величины в процессе подачи проволоки, но отношение $\frac{\mu}{\mu_0}$ достаточно точно может быть установлено экспериментально (рис. 2).

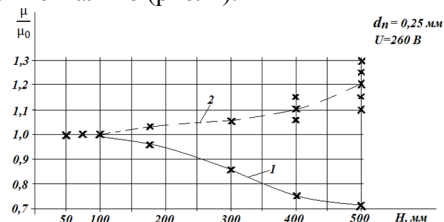


Рис. 2. Изменение величины $\frac{\mu}{\mu_0}$ в зависимости от толщины детали: 1 - при автоколебательном процессе обработки; 2 - при предложенном способе стабилизации процесса

Условия стабилизации процесса обработки ЭП деталей повышенной толщины

При выполнении расчетов параметров процесса [8;9] в качестве ограничения используется величина S_{δ} , которая зависит не только от толщины разделяемой детали, но и стабилизации процесса.

Величины отскока или перемещения ЭП от поверхности касания проволокой детали до конца ее перемещения измеряются вдоль паза в обратном направлении. При этом было принято

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{S_{\delta} + \Delta l_n}{S_{\delta 0} + \Delta l_{n0}} \quad (8)$$

Здесь $S_{\delta 0}$ - боковой зазор при толщине детали на границе устойчивого протекания процесса; Δl_{n0} - отброс проволоки от осевого положения при устойчивом протекании процесса (без использования стабилизации положения ЭП). Величины $S_{\delta 0}$ и S_{δ} выбирают для каждой толщины детали по рис. 3.

На рис. 3 приведено изменение S_{δ} для латунной проволоки $d_n=0,25$ мм при использовании электроэрозионного (а) и комбинированного (б) процесса.

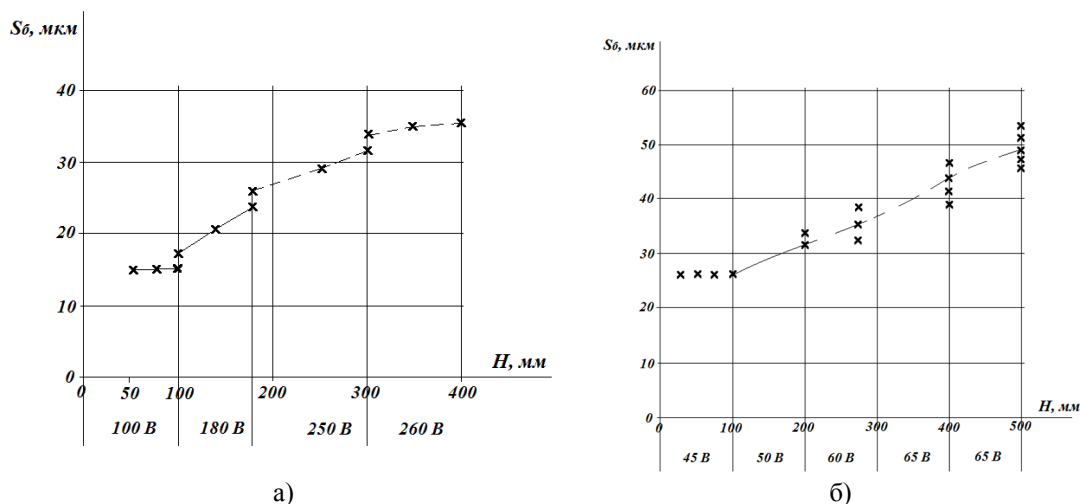


Рис. 3. Изменение бокового зазора при обработке деталей ЭП: а) электроэрозионный процесс; б) комбинированная обработка. Пунктиром показана обработка со стабилизацией процесса

Следует обратить внимание на ступенчатое изменение более чем в 1,5 раза напряжения, т.к. при обработке аустенитной стали ЭИ435 происходит изменение ширины паза, и без увеличения напряжения процесс становится нестабильным даже при регулировании его внешним воздействием. При комбинированной обработке (рис. 3, б) боковой зазор возрастает за

счет химической составляющей процесса, но и здесь напряжение пришлось увеличивать в 1,4-1,5 раза.

Стабилизация положения проволоки в пазах позволяет стабилизировать процесс обработки (рис. 4), что видно по улучшению интенсивности процесса (росту осредненной силы тока и снижению частоты колебаний ЭП в пазах).

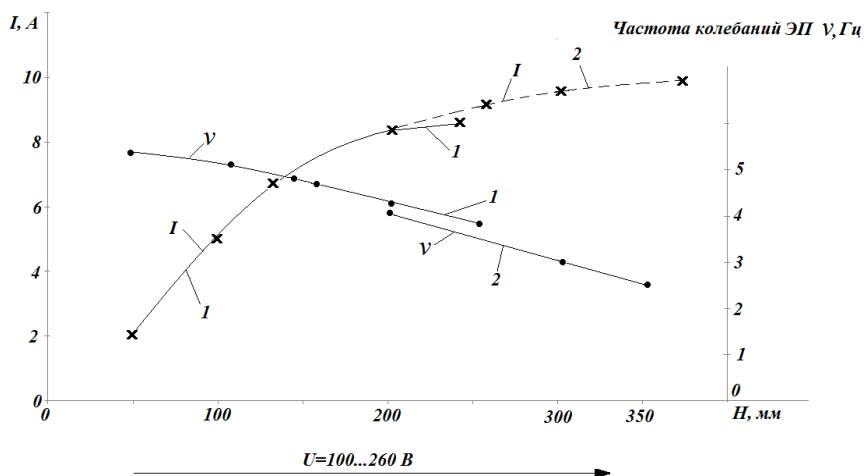


Рис. 4. Изменение осредненной силы тока I и частоты колебаний v ЭП от толщины детали H . Диаметр проволоки – 0,25 мм; скорость перемотки – 1,5 м/мин; натяжение – 15 Н. 1 – без стабилизации процесса; 2 – со стабилизацией положения ЭП. Пунктиром показана обработка со стабилизацией процесса

Снижение частоты колебаний v на рис. 4 уменьшает вероятность возникновения резонансных перемещений проволоки и появления

автоколебательного процесса с нарастанием величины отклонения проволоки от начального положения (рис. 5).

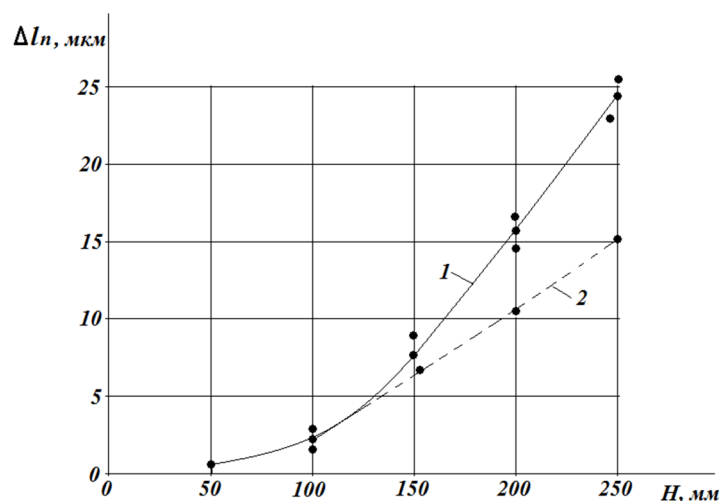


Рис. 5. Изменение величины прогиба Δl_n проволоки при различной толщине H детали. Диаметр проволоки – 0,25 мм; скорость перемотки – 1,2 м/мин; натяжение – 8 Н. Пунктиром показана обработка со стабилизацией процесса

Из рис. 5 видно, что стабилизация в пазе положения проволоки значительно снижает ее отклонение Δl_n от начального положения (кривые 1 и 2 на рис. 5), что улучшает условия обработки деталей повышенной толщины. Результат стабилизации проявляется тем полнее, чем больше толщина участка детали, меньше диаметр и натяжение проволоки. Скорость перемотки обычно выбирают со значительным запасом, поэтому этот диаметр не влияет на изменение Δl_n . Но повышенная скорость вызывает перерасход проволоки, в том числе многослойной, которая имеет высокую стоимость. Это негативно влияет на себестоимость продукции, поэтому при назначении технологических режимов необходимо назначать обоснованные величины этого технологического параметра.

Заключение

Проведенные исследования процесса обработки ЭП деталей с большой толщиной позволили установить закономерности поведения инструмента в пазе при увеличенном расстоянии между опорами проволоки, когда возникают автоколебательные процессы, нарушающие стабильность разделения материалов. Это дало возможность учесть изменение толщины детали при проектировании технологических параметров обработки, повысить качество продукции [10] и расширить область использования перспективного способа на широкую номенклатуру деталей в создаваемых наукоемких изделиях специального и общего машиностроения.

Литература

1. Лазарев, Г.С. Автоколебания при резании металлов [Текст]: учебник/ Г.С. Лазарев. - М.: Высш. шк., 1971.-244 с.

2. Лазарев, Г.С. Устойчивость процесса резания металлов [Текст]: учебник/ Г.С. Лазарев. - М.: Высш. шк., 1973. -184 с.

3. Кравченко, К.Ю. Разработка и обоснование новых режимов и технологии концевой фрезерования при условии обеспечения устойчивого резания [Текст]: автореферат диссертации на соиск. уч. ст. к.т.н. Екатеринбург, 2016. -18 с.

4. Красильников, А.Я. Исследование устойчивости систем с запаздыванием, описывающих процесс фрезерования в случае с одной степенью свободы [Текст]/ А.Я. Красильников, К.Ю. Кравченко //Вестник машиностроения, 2013. № 9. -С. 67-75.

5. Патент 2466835 (РФ) В23Н. Способ эрозионно-термической обработки [Текст]/ С.Н. Коденцев, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, М.А.Уваров // Бюл. изобр., 2012, №32.

6. Патент 2555266 (РФ) В23Н. Способ изготовления проволочного электрода-инструмента для электроэрозионной обработки [Текст]/ В. П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев // Бюл. изобр., 2015, №19.

7. Смоленцев, В.П. Изготовление единичных мелко модульных эвольвентных профилей непрофилированным электродом (раздел 7) [Текст]: Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: монография: в 5 т. / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, В.В. Золотарёв ; под ред. А.В. Киричека. М: Изд. дом "Спектр", 2014. -Т.4. - С. 325 – 368.

8. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки [Текст]: учеб. пособие/Е.В. Смоленцев.- М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

9. Кириллов, О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом [Текст]: учеб. пособие/ О.Н. Кириллов. Воронеж: ВГТУ, 2010. 254 с.

10. Мельников, В.П. Управление качеством / В.П. Мельников, В.П. Смоленцев, А.Г. Схиртладзе // М.: Академия, 2009. – 352 с.

PARAMETERS OF TREATMENT PROCESS BY WIRE ELECTRODE TAKING INTO ACCOUNT SELF-VIBRATION OF TOOL

V.V. Zolotarev, postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Z.V.V.220975@mail.ru

V.P. Smolentsev, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vsmolen@inbox.ru.

Researches for increase thickness of details cut by wire electrode on electro erosion equipment and machines for combined treatment are given in the article. Regularities of formation mechanism of wire in slot low-frequency self-vibration are identified for this. Conditions, at which movements of tool can be limited and completely excluded, are showed. Complex problem for creating new (at the level of invention) method of movement process stabilization of wire electrode in long length slot is solved. Development of equipment and technology, based on new methods and devices, protected by protection documents, is important now. It was necessary to create calculation procedure of process parameters taking into account self-vibration of tool for realization of created method. Limits through thickness of machined area of detail, where process stabilization can be achieved by tension of wire electrode and increase speed of wire-winding, are scientifically based and determined. However, this decision allows cover just a part of component spectrum, where treatment process by wire electrode has advantages. Given materials allows form the base for increase field of use of new technological processes in machine building and provide competitive ability of technical equipment in this field for electrical method of treatment

Given materials used for creation of perspective items in aerospace field, where electrical methods of treatment are more currently important and open possibility to design of perspective scientific products manufacturing of which are not possible by traditional methods and economically not effective. Also given results develop manufacturing technology of unique basic components and parts in different fields of machine building

Key words: wire electrode, self-vibration, product thickness, stabilization, process parameters

References

1. Lazarev, G.S. Avtokolebanija pri rezanii metallov [Self-vibration during cut of metals]: uchebnik. - M.: Vyssh. shk., 1971.-244 s.
2. Lazarev, G.S. Ustojchivost' processa rezanija metallov [Process stability of cut of metals]: uchebnik. - M.: Vyssh. shk., 1973. -184 s.
3. Kravchenko, K.Ju. Razrabotka i obosnovanie novyh rezhimov i tehnologii koncevogo frezerovaniya pri uslovii obespecheniya ustojchivogo rezanija [Development and explanation of new modes and technology of end milling under condition of cut stability providing]: avtoreferat dissertacii na soisk. uch. st. k.t.n. Ekaterinburg, 2016. -18 s.
4. Krasil'nikov A.Ja., Kravchenko K.Ju. Issledovanie ustojchivosti sistem s zapazdyvaniem, opisyvajushhih process frezerovaniya v sluchae s odnoj stepen'ju svobody [Investigation of stability system with delay, described milling process in case with one degree of freedom]/ A.Ja. Krasil'nikov, //Vestnik mashinostroenija, 2013. № 9. -S. 67-75.
5. Patent 2466835 (RF) V23N. Sposob jerozionno-termicheskoj obrabotki [Method of erosion-heat treatment]/ S.N. Kodencev, V.P. Smolencev, G.A. Suhochev, M.A.Uvarov // Bjul. izobr., 2012, №32.
6. Patent 2555266 (RF) V23N. Sposob izgotovlenija provolochnogo jelektroda-instrumenta dlja jelektrojerozionnoj obrabotki [Method of manufacturing of wire electrode tool for electro erosion treatment]/ V. P. Smolencev, A.I. Boldyrev, E.V. Smolencev // Bjul. izobr., 2015, №19.
7. Smolencev V.P., Kuzovkin A.V., Zolotarjov V.V. Izgotovlenie edinichnyh melkomodul'nyh jevol'ventnyh profilej neprofilirovannym jelektrodom (razdel 7) [Manufacturing of singular fine grained involute profiles by non-core electrode (section 7)]. Progressivnye mashinostroitel'nye tehnologii, oborudovanie i instrument: monografija; Pod red. A.V. Kiricheka. V 5 t. T.4. M: Izd. dom "Spektr", 2014. - S. 325 – 368.
8. Smolencev, E. V. Proektirovanie jelektricheskikh i kombinirovannyh metodov obrabotki [Designing of electrical and combined methods of treatment]: ucheb. posobie.- M.: Mashinostroenie, 2005. – 511 s.
9. Kirillov, O.N. Tehnologija kombinirovannoj obrabotki neprofilirovannym jelektrodom [Technology of combined treatment by non-core electrode]: ucheb. posobie. Voronezh: VGTU, 2010. 254 s.
10. Mel'nikov V.P. Smolencev V.P., Shirladze A.G. Upravlenie kachestvom [Quality management]. M.: Akademija, 2009. – 352 s.