

**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗАОЧНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**НАУКА И ТЕХНИКА
XXI ВЕКА**

Новосибирск, 2011 г.

УДК 62
ББК 30
Н 34

Рецензент — кандидат физико-математических наук, Зеленская Татьяна Евгеньевна, Югорский государственный университет (г. Ханты-Мансийск)

Н 34 «Наука и техника XXI века»: материалы международной заочной научно-практической конференции. (14 ноября 2011 г.) — Новосибирск: Изд. «Априори», 2011. — 148 с.

ISBN 978-5-4379-0021-5

Сборник трудов международной заочной научно-практической конференции «Наука и техника XXI века» отражает результаты научных исследований, проведенных представителями различных школ и направлений современных технических наук.

Данное издание будет полезно аспирантам, студентам, исследователям в области прикладной науки и всем интересующимся актуальным состоянием и тенденциями развития технических наук.

ББК 30

ISBN 978-5-4379-0021-5

Оглавление

Секция 1. Машиностроение и машиноведение	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ СВЕРЛЕНИЯ Басыров Игорь Александрович Мерсон Дмитрий Львович Разуваев Александр Александрович Литвинов Александр Юрьевич	7
СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ Салимова Анна Владимировна	15
Секция 2. Авиационная и ракетно-космическая техника	19
АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ТОРСИОНА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ Горелов Алексей Вячеславович	19
Секция 3. Электротехника	27
НОВЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ Виноградов Константин Михайлович	27
ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ МОБИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ. Усов Анатолий Фёдорович Потокин Александр Сергеевич	31

Секция 4. Радиотехника и связь **40**

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР 40

Андросик Андрей Борисовия
Воробьев Сергей Андреевич
Мировицкая Светлана Дмитриевна

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФОТОННЫХ СТРУКТУР 52

Андросик Андрей Борисовия
Воробьев Сергей Андреевич
Мировицкая Светлана Дмитриевна

МНОГОМЕРНЫЕ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД СЛУЧАЙНО-ШЕРОХОВАТОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ 66

Захаров Фёдор Николаевич

СЕНСОРНАЯ КЛАВИАТУРА ДЛЯ НАБОРА ТЕКСТА ЛЮДЬМИ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ. РЕАЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА MSP430G2452IN20 75

Степанов Андрей Борисович

Секция 5. Информатика, вычислительная техника и управление **79**

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ 79

Авяшкиева Надежда Сергеевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОИСКА ПУТИ В ЛАБИРИНТЕ ПРИ ПОМОЩИ UML ДИАГРАММ И СЕТЕЙ ПЕТРИ 84

Марков Александр Владимирович
Романиков Дмитрий Олегович
Воевода Александр Александрович

МОДЕЛЬ ГРУППИРОВКИ ОБЪЕКТОВ, ОСНОВАННАЯ НА БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЯХ 90

Пономарев Андрей Васильевич

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОДЕКА, НА ОСНОВЕ ЧИРГПЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ДЛЯ КОМПРЕССИИ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ ИНФОРМАЦИИ С КОДЕКАМИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ФУРЬЕ И ВЕЛЬВЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ Тулский Иван Николаевич	94
Секция 6. Энергетика	99
КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ И ПЛАМЕНИ Абдуракипов Сергей Сергеевич Дулин Владимир Михайлович	99
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУПЕРКАВИТАЦИОННОМ ИСПАРИТЕЛЕ Кулагин Владимир Алексеевич Пьяных Татьяна Анатольевна	105
Секция 7. Metallургия и материаловедение	110
МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА НЕЙРО- НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ Бажинов Алексей Николаевич	110
Секция 8. Химическая технология	116
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ ПОЛИГИДРОКСИ-1,4-НАФТОХИНОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ Савченко Вячеслав Георгиевич Бабин Юрий Владимирович	116
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ГРОЗНЕНСКОЙ НЕФТИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА МАЛОТОННАЖНОЙ УСТАНОВКЕ Такаева Мадина Атлаевна Пивоварова Надежда Анатольевна	122

**Секция 9. Технология продовольственных
продуктов** **127**

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОВЯДИНЫ И
МЯСА ЯКА МЕТОДОМ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ 127
Озбекова Жылдызай Эрназаровна
Кулмырзаев Асылбек Атамырзаевич

Секция 10. Транспорт **132**

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ 132
КАК СВОЙСТВО ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА
Буракова Анжелика Васильевна

Секция 11. Строительство и архитектура **137**

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖИДКИХ 137
КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЙ ТИПА
«КОРУНД» СОВМЕСТНО С РАЗЛИЧНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ
Жуков Артем Николаевич

УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН 142
ОБОЙМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИБРОБЕТОНА
Поднебесов Павел Геннадьевич
Каюмова Зиля Минияровна

СЕКЦИЯ 1.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ СВЕРЛЕНИЯ

Басыров Игорь Александрович

магистр, ТГУ, г. Тольятти

Мерсон Дмитрий Львович

профессор, д.ф.-м.н., ТГУ, г. Тольятти

E-mail: d.merson@iltsu.ru

Разуваев Александр Александрович

к.т.н., ТГУ, г. Тольятти

E-mail: a.razuvaev@iltsu.ru

Литвинов Александр Юрьевич

студент, ТГУ, г. Тольятти

Повышение производительности всегда было одной из главнейших задач теории и практики обработки резанием. Основным направлением в решении этой задачи на сегодняшний день является полная автоматизация процесса резания. При этом автоматизированная система должна включать в себя эффективную методику контроля, на основе которой она сможет самостоятельно выявлять нарушения процесса резания, вызванные износом режущего инструмента, отклонениями от заданных свойств обрабатываемого материала и др. В дальнейшем такой метод контроля может быть значительно усовершенствован и использован для быстрого поиска оптимальных сочетаний параметров резания без проведения стойких испытаний.

Для применения в данной области одним из наиболее перспективных методов контроля является метод акустической эмиссии (АЭ). В процессе обработки деталей резанием возникают интенсивные ультразвуковые колебания, которые при адекватных

методах регистрации и обработки дают информацию, позволяющую судить о допустимости режима резания.

Существующие методы ультразвукового контроля процесса резания, основанные на анализе энергетических параметров, позволяют с достаточной надёжностью фиксировать момент нарушения режима резания вследствие износа сверла [2]. Однако единственным критерием оценки процесса резания для таких методов является уровень активности АЭ, повышение которого фиксируется при любом нарушении стабильности процесса, независимо от причины. Такой подход даёт лишь общую оценку и не позволяет оценить влияние отдельных факторов.

Между тем существует твердое убеждение в том, что потенциальная информативность метода АЭ значительно выше. Современные цифровые технологии позволяют проводить глубокий анализ сигналов АЭ путём вычисления частотного распределения и его дальнейшей обработки, что в перспективе позволит разработать эффективную универсальную методику контроля режимов резания.

Целью данной работы является установление связи параметров АЭ с режимами сверления.

Образцы для исследования представляли собой пластины толщиной 4 мм, изготовленные из стали 07ГБЮ. Сверление осуществлялось с помощью электрической дрели «ДУ 16/1000ЭР Интеркол» и свёрл из стали Р6М5 диаметром 7 мм. При обработке дрель и образец закреплялись в штативе.

Эксперименты проводились при различных скоростях сверления без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Для уточнения значения скоростей вращения сверла использовали редуктор и компьютерную мышь. В тексте использованы следующие обозначения скоростей: 1 — 280 об/мин, 2 — 400 об/мин, 3 — 470 об/мин, 4 — 600 об/мин. При значениях скоростей, меньших по сравнению с указанными, сверление не происходило, при больших — возникал сильный разогрев и был слышен визг, что говорит об интенсивном износе сверла. Для каждого отверстия использовали новое сверло.

Для сбора данных использовался широкополосный пьезодатчик. С датчика сигнал АЭ направлялся в усилитель MSAE-FA010 производства Microsensors AE Ltd. (г. Саров) со встроенным фильтром и блоком формирования среднеквадратического значения (RMS) сигнала АЭ. Использовали усиление 60 дБ и полосу частот 50...1200 МГц.

Для записи сигналов применялась разработанная в ТГУ установка ЭЯ-2, представляющий собой компьютер, в который

интегрированы две платы аналого-цифрового преобразования (АЦП) производства ЗАО «Руднев — Шиялев». Плату «медленного» АЦП LA1.5PCI-14 в данном эксперименте использовали для непрерывной записи RMS, выделяемого усилителем, с частотой дискретизации 25 Гц. Плата «быстрого» АЦП LA-n20-12PCI при превышении сигналом АЭ порогового уровня фиксирует последовательность мгновенных значений его амплитуды (кадр). Эта плата имеет буферную память, что позволяет записывать предысторию, т.е. записанный кадр начинается до того, как сигнал превышает порог.

При записи кадров использовали следующие настройки: частота дискретизации 6,25 МГц, длина кадра 0,655 мс (4096 отсчетов). Полный коэффициент усиления составлял 66 дБ. Высоту порога выбирали таким образом, чтобы при работе дрели на холостом ходу не было срабатывания быстрого АЦП.

Для обработки полученных данных использовался пакет программ, осуществляющих для каждого кадра вычисление спектра мощности методом быстрого преобразования Фурье и кластеризацию кадров по признаку подобия спектров в соответствии с методикой, описанной в работе [1].

Рассматривали характеристики четырех самых больших по количеству сигналов групп, объединяющих не менее 90% сигналов. Остальные группы крайне малочисленны и не представляют интереса.

На первых трех скоростях разделение сигналов на группы совершенно равнозначно. Усредненные спектральные образы для основных групп сигналов показаны на рисунке 1. В таблице 1 для скорости 1 приведены данные о количестве сигналов в группах, а также значения средней энергии и медианной частоты сигналов. (Медианной называется частота, делящая площадь под кривой спектра на две равные части).

Общий характер появления сигналов четырех основных групп во времени для первых трех скоростей сверления также одинаков и имеет определенную стадийность (рисунок 4).

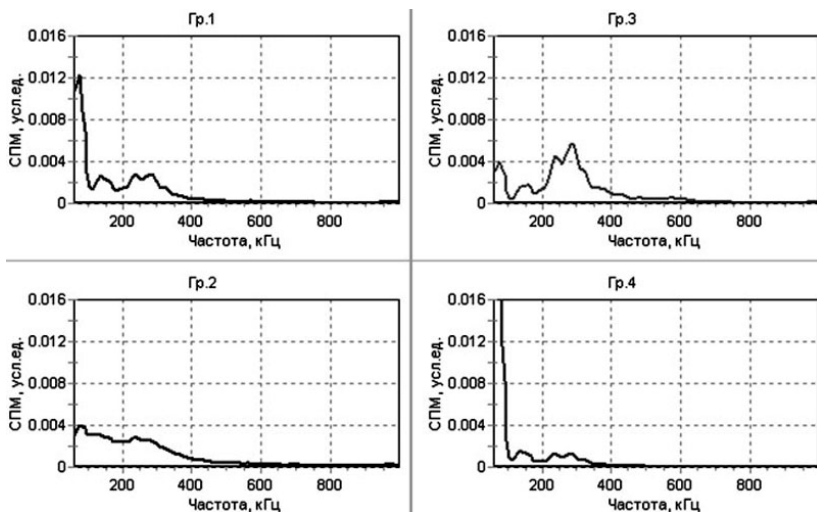


Рисунок 1. Спектральные профили сигналов АЭ основных групп для скоростей сверления 1–3

Таблица 1.

Характеристики основных групп сигналов АЭ для скорости 1

Группа	Кол-во сигналов	Доля в общем кол-ве, %	Средняя энергия, услед.	Средняя медианная частота, кГц
1	1305	59	6200	150
2	380	17	2947	217
3	171	7,7	16141	264
4	143	6,5	9384	70

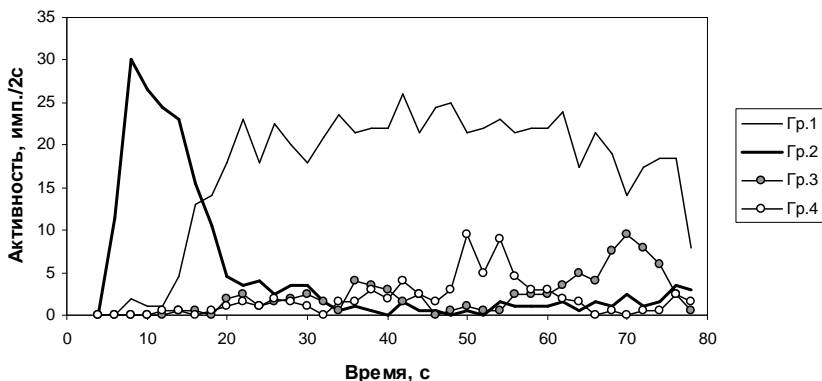


Рисунок 2. Активность сигналов АЭ основных групп (скорость 1)

Сигналы группы 1 возникают почти на протяжении всего процесса сверления и сравнительно равномерно распределены во времени. В средней части графика наблюдается повышенная активность сигналов группы 4 (с самой низкой медианной частотой), а незадолго до окончания сверления — сигналов группы 3 (с самой высокой медианной частотой). Кроме того, на средней стадии процесса в более или менее заметной форме проявляется снижение медианной частоты сигналов группы 1 (рисунок 3).

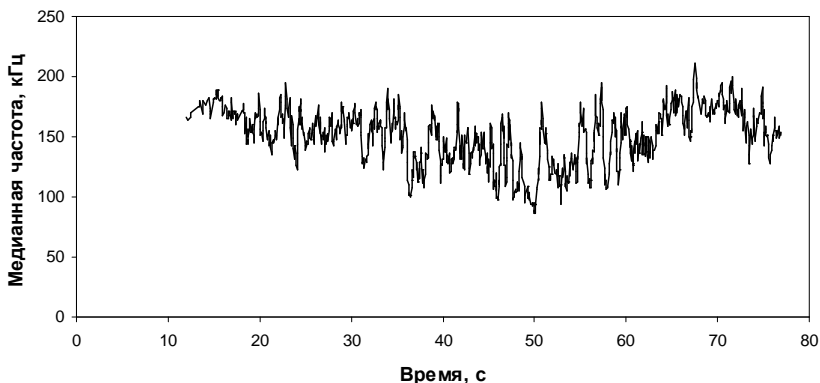


Рисунок 3. Зависимость медианной частоты сигналов АЭ группы 1 от времени прихода (скорость 1), сглаживание по 9-ти точкам

Сравнение усредненных спектральных образов групп 1, 3 и 4 (рисунок 1) показывает, что основные пики на спектрах сигналов этих групп одни и те же и отличаются только относительной высотой. Можно предположить, что сигналы данных групп близки по природе происхождения, а отличие между ними вызвано изменением величины усилия, передаваемого на сверло. При сверлении средней части образца это усилие максимально, что вызывает интенсивное отделение стружки и разогрев металла. На завершающей стадии сверления это усилие уменьшают, что приводит к облегчению условий сверления.

Увеличение скорости сверления приводит к повышению среднего значения энергии сигналов АЭ, что согласуется с повышением уровня RMS и является ожидаемым результатом. Кроме того, наблюдали увеличение среднего значения медианной частоты для сигналов группы 3.

Для сигналов группы 2, спектр которых отличает отсутствие резко выраженных максимумов (рисунок 1), а энергия — самая маленькая (таблица 1), предполагается, что они связаны с электрическими помехами, вызванными работой дрели. Типичная форма сигнала этой группы показана на рисунке 4. Такие же сигналы наблюдаются на холостом ходу работы дрели, но их амплитуда не превышает пороговый уровень.

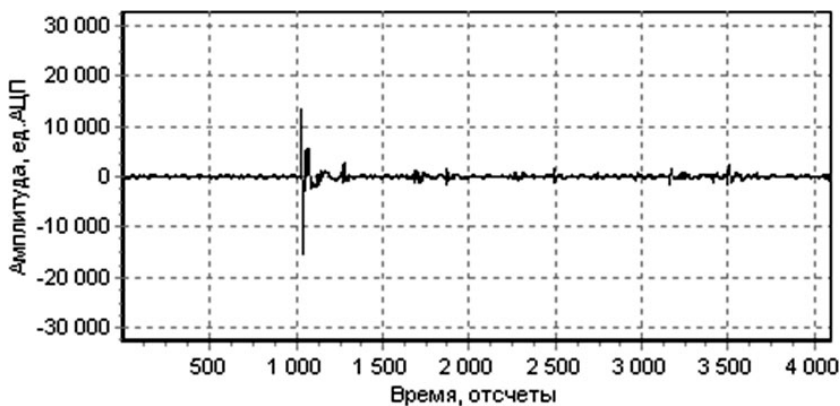


Рисунок 4. Форма сигнала, относящегося к группе 2

Сигналы группы 2 наблюдаются главным образом в начале и в конце сверления, когда процессы, сопровождающие резание, не так интенсивны. Исчезновение этих сигналов на средней стадии сверления

связано как раз с тем, что они перекрываются более полезными сигналами. Борьба с помехами путем увеличения порога представляется нецелесообразным, так как при этом можно потерять часть ценной информации. Лучше отбраковывать их на стадии обработки данных, учитывая сходство их спектров и малый уровень энергии.

При сверлении на скорости 4 сигналы, ранее входившие во вторую группу, пропадают (рисунок 5). В спектрах сигналов групп 1, 3 и 4 (теперь это группы 1, 2 и 3) наблюдается относительное увеличение низкочастотной составляющей (ниже 100 кГц). Вместе с тем, наблюдается небольшое количество сигналов с ярко выраженным пиком в области 300 кГц (группа 4 на рисунке 5).

Основные характеристики групп сигналов АЭ при сверлении на скорости 4 представлены в таблице 2.

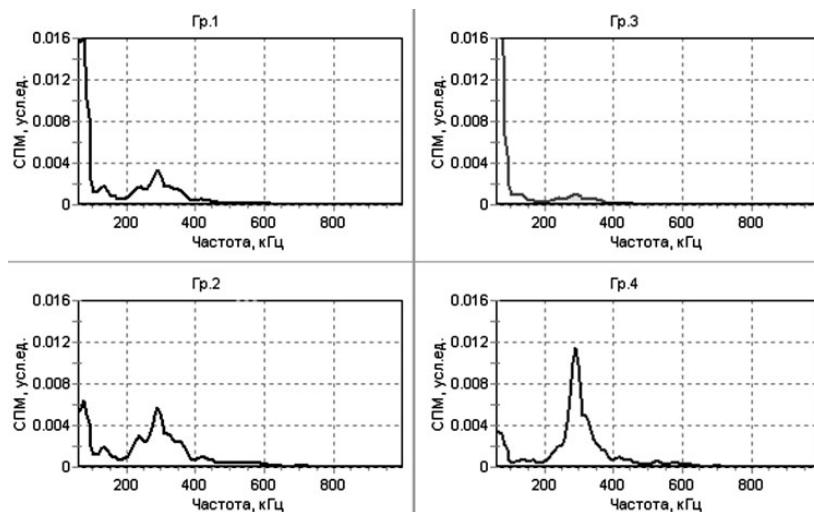


Рисунок 5. Спектральные профили при сверлении на скорости 4

Таблица 2.

Характеристики основных групп сигналов АЭ для скорости 4

Группа*	Кол-во сигналов	Доля в общем кол-ве, %	Средняя энергия, усл.ед.	Средняя медианная частота, кГц
1 (1)	1091	73	13900	126
2 (3)	266	18	17800	260
3 (4)	45	3,0	14262	64
4	20	1,3	17240	286

* Примечание: в скобках указано примерное соответствие номеру группы для скоростей 1—3.

Стадийность появления сигналов разных групп во времени на скорости 4 сохраняется: на средней стадии фиксируются сигналы с низкой медианной частотой, на начальной и конечной стадии — сигналы с повышенной медианной частотой (см. рисунок 6 и таблицу 2).

Таким образом, спектральные характеристики сигналов АЭ при разных скоростях сверления в большой степени подобны друг другу и, тем не менее, довольно чувствительны к режиму сверления. Снижение медианной частоты сигналов свидетельствует об утяжелении условий обработки.

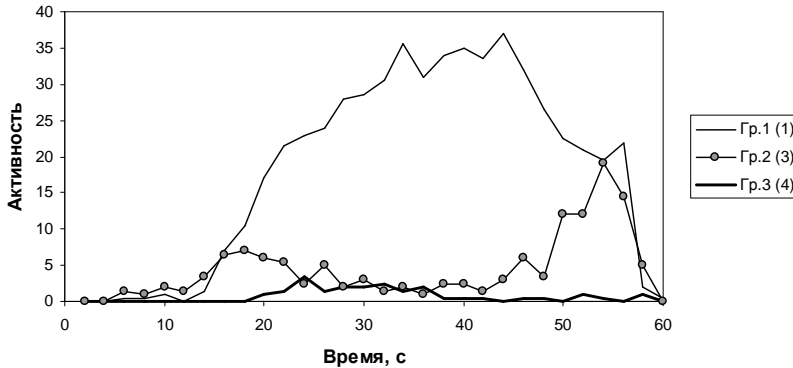


Рисунок 6. Активность сигналов АЭ основных групп (скорость 4)

Список литературы:

1. Мерсон Д. Л., Разуваев А. А., Виноградов А. Ю. Применение методики анализа спектральных образов сигналов акустической эмиссии для исследования повреждаемости покрытий TiN на стальной подложке // Дефектоскопия. 2002. № 7. С. 37—46.
2. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. М. : Машиностроение, 1988. 53 с.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Салимова Анна Владимировна

*аспирантка, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург*

E-mail: salimova-a@mail.ru

Интеграция российской экономики в мировую, связанная со вступлением нашей страны во Всемирную торговую организацию (ВТО) требует серьезного улучшения качества производимых отечественным машиностроением изделий.

Качество изделия в целом во многом определяется точностью изготовления отдельных его деталей и их сборкой. Анализ погрешностей изготовления деталей и сборки, последующие выявления причин, порождающих эти погрешности, дают возможность установить «вклад» этих погрешностей в общую точность обработки деталей. Это, в конечном счете, позволяет снизить количество несоответствий и брака, а значит повысить экономическую эффективность производства.

В XX веке управление технологическими процессами (ТП) фактически ограничивалось первоначальной настройкой станка, подналадкой изменяющей только положение обрабатываемого инструмента и наконец, сменой изношенного инструмента.

При исследовании ТП широкое применение находили статистические методы. Эти методы широко освещались в научно-технической литературе, например, в [2]. Обобщая их, можно сказать, что существовала целая статистическая теория управления техническими процессами.

Математической моделью точности ТП в этой теории служил вероятностный закон распределения размеров или других точностных параметров изготовленной детали. Исследования точности с помощью кривых распределения давало возможность объективно оценивать точность различных методов механической обработки. Универсальность, единая методика исследований, простота вычислений обеспечили широкое распространение этого метода. Карты среднего и размаха являются эффективным инструментом свертки данных, позволяющими отделить естественную вариацию процесса от воздействий в результате действия появляющихся причин [3].

Следует, однако, отметить ряд недостатков существовавшей теории, в частности:

- не учитывается последовательность изготовления деталей;
- закономерно изменяющиеся погрешности не отделяются от случайных, влияние тех или других выявляется как рассеивание точностного параметра;
- не удается распознать каждую из величин, влияющих на результат процесса.

Значительное место в статистической теории точности занимает установление корреляционных связей в технологических процессах [1], позволяющих произвести вероятностный анализ причинного влияния на точность технологического процесса различных факторов.

Недостатки рассматриваемых моделей на наш взгляд заключаются в следующем:

- не учитываются локальные закономерности причинного влияния, т.к. производится лишь грубая аппроксимация реально существующих закономерностей;
- наблюдаемые значения должны быть некоррелированы между собой, в то время как для реальных технологических процессов это условие не выполняется.

В XXI веке требования потребителя продукции коренным образом изменились: «Мне нужно то, не знаю что, сейчас, надежность и качество на мировом уровне, а за ценой я не постою». Появившаяся система CRM позволяет осуществлять непосредственный контакт с потребителями и производить свою продукцию в соответствии с индивидуальными потребностями потребителя.

Решение проблемы организации производства, перенастраиваемого в зависимости от потребности рынка, основывается на использовании принципов гибкости. К направлению

обеспечения гибкости относят: гибкость проектирования, гибкость технологии, гибкость логистики и гибкость психологии участников производства.

Гибкость технологии обеспечивается новыми разработками в станкостроении — гибкими производственными системами (ГПС). ГПС являются промежуточным звеном между жесткими автоматическими линиями, которые обеспечивают максимальную производительность, и автономными станками с ЧПУ, которые обеспечивают максимальную гибкость при переходе с одного вида деталей на другой.

Сложным системам, к которым относится ГПС, присущи особые свойства — уникальность, слабопредсказуемость, негэнтропийность.

Для изучения этих свойств требуется привлечение современных методов термодинамики неравновесных процессов, синергетики, теории и методов случайных процессов. Понятие «технологическая система» можно заменить на понятие «эволюционирующая технологическая структура».

Введем ряд определений и постулатов. В частности:

Определение 1. Эволюционирующая технологическая структура (ЭТС) это — совокупность элементов, подсистем и систем, участвующих в процессе получения детали из заготовки, а также отношений, связывающих их в процессе производства и обуславливающих целенаправленное изменение качественного состояния объекта производства.

Определение 2. Флуктуация технологической структуры есть некоторое изменение в величине (а может быть, и характерное) связей между элементами, подсистемами и системами, образующими ЭТС, приводящее к отклонению параметра, характеризующего функционирование ЭТС, от его среднего значения.

Постулат 1. Процесс протекания механической обработки сопровождается процессами последовательного возникновения и рассасывания различных типов флуктуаций ЭТС, приводящими к последовательности неустойчивостей процесса механической обработки.

Постулат². Флуктуации ЭТС образуют флуктуации, обусловленные спонтанными переходами ЭТС из одного состояния в другое, и флуктуации, обусловленные индуцированными переходами ЭТС в различные состояния.

Определение 3. Спонтанная флуктуация — флуктуация, самопроизвольно порождаемая самой ТС.

Определение 4. Индуцированная флуктуация — флуктуация, порождаемая внешним окружением ЭТС, обладающим собственно динамикой и стохастичностью.

Рассмотренные закономерности адекватно моделируются методами выборочного анализа многомерных временных рядов [4]. При небольших выборках применяются смешанные модели авторегрессии и скользящего среднего. Для адекватного описания наблюдаемых последовательностей процессов этими моделями, используется метод максимального правдоподобия. При значительных объемах полученных данных применяются статистические методы спектрального анализа.

В качестве инструмента, позволяющего выявить закономерности неустойчивого поведения ЭТС, используются выборочные оценки корреляционной функции и спектральной плотности наблюдаемой последовательности процессов на входе и на выходе.

Оценка корреляционной функции характеризует причинно-вероятностные связи между состояниями ЭТС в последовательные моменты времени ее функционирования, позволяя определить, меняется ли во времени комплекс условий, в которых функционирует исследуемая ЭТС.

Сглаженная оценка спектральной плотности процесса, фиксируемого на выходе ЭТС, характеризует частотную структуру исследуемого процесса, показывая, как распределяется дисперсия этого процесса в изучаемом частотном диапазоне функционирования ЭТС. Присутствие пиков в этой оценке определяет частоты, на которых происходят спонтанные и индуцированные переходы исследуемой ЭТС, выделяя тем самым влияние случайных факторов на точность изготовления деталей, периодичность такого влияния и его значение.

Список литературы:

1. Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. — М.:Машиностроение, 2005. — 352 с.
2. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. — М.: «Машиностроение», 1972. — 216 с.
3. Уилер Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта/ Дональд Уилер, Дэвид Чамберс. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. — 409 с.
4. Хеннан Э. Многомерные временные ряды. — М.: Мир, 1974. — 575 с.

СЕКЦИЯ 2.

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ТОРСИОНА НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Горелов Алексей Вячеславович

соискатель, КНИТУ им. А. Н. Туполева, г. Казань

E-mail: a.gorelov@inbox.ru

В настоящее время наряду с классическими трехшарнирными втулками несущего винта (НВ) все более широкое распространение получают бесшарнирные втулки с упругими элементами торсионного типа. Исследованный в работе торсион представляет склеенную слоистую стеклопластиковую балку, которая применяется во втулке НВ вертолета «Ансат».

В работе проведены расчеты по определению параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов торсиона НВ при полетных нагрузках. Выявлены наиболее нагруженные места в резиновых слоях и для снижения напряжений предложена измененная укладка резиновых слоев в комлевой и концевой частях в виде клиновидного изменения длины слоев по толщине.

На рис. 1 а показана геометрическая модель исходного рукава торсиона, построенная на основе чертежей предоставленных разработчиками. Торсион состоит из слоев стеклоткани Т-25(ВМ) с углами армирования по отношению к продольной оси — 0° (рис. 1 б), $\pm 45^\circ$ (рис. 1 в) а также (рис. 1 г). Слои резины являются продолжением слоев стеклоткани Т-25 с углами армирования $\pm 45^\circ$. Все соединения выполнены склеиванием.

С помощью пакета программ SolidWorks построена геометрическая модель рукава торсиона. Слои материала, имеющие одинаковые физико-механические характеристики, моделировались в SolidWorks с помощью операции «Разделить» и представлялись отдельными телами (рис. 1 б, в, г).

На основе геометрической модели SolidWorks с помощью конечно-элементного (КЭ) пакета программ ANSYS на языке APDL создана КЭ модель рукава торсиона. Для этого модель частями (рис. 1 б, в, г) из SolidWorks сохранялась в файл формата x_t (Parasolid), а затем импортировалась программой ANSYS.

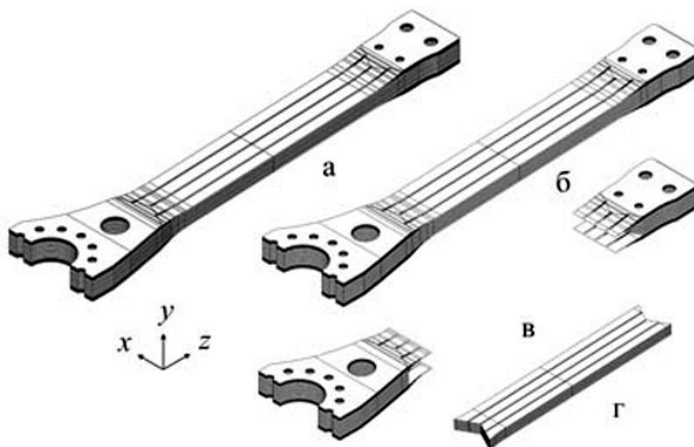


Рисунок 1. Геометрическая модель рукава торсиона:
а — в сборе; б — слой стеклоткани Т-25 (0°); в — слой стеклоткани Т-25 (±45°); г — слой резины Р-181

При расчете НДС рукава торсиона для материалов его элементов использовалась модель упругого деформирования ортотропного материала. Пара слоев с углами армирования $\pm 45^\circ$ заменялась материалом из одного слоя. Такой подход описан в работе [1].

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики (ФМХ) материалов, которые использовались при расчетах.

Таблица 1.

Физико-механические характеристики материалов

Материал	Модули упругости при растяжении и сдвиге, МПа						Коэффициенты Пуассона		
	E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
T25 (0°)	18300	3300	49000	1300	1300	6170	0,35	0,015	0,084031
T25 (±45°)	18689	3300	18689	1300	1300	15051	0,16582	0,02928	0,51451
P-181	6			2,013			0,49		

При разбиении торсиона на КЭ, в виду сложности конструкции использовались 10-ти узловые трехмерные квадратичные КЭ SOLID187 в форме четырехгранника [2] (рис. 2). Для моделирования действия болтов крепления лопасти к торсиону в концевой части и приложения внешних нагрузок со стороны лопасти использовался элемент многоточечных связей MPC184 с включенной опцией жесткой балки [2] (рис. 2).

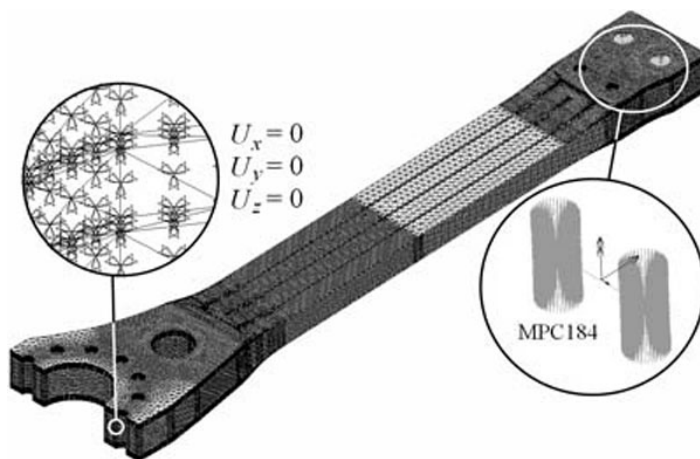


Рисунок 2. Конечно-элементная модель рукава торсиона и граничные условия

Конечно-элементную модель рукава торсиона, для задания свойств материалам, условно, можно разделить на две части — комлевую жесткую (выделена рамкой на рис. 3) и жестко-упругую с концевой (рис 3). Комлевой жесткой части свойства материала назначались в глобальных осях x, y, z (рис. 1), а жестко-упругой с концевой в специально введенной локальной системе координат повернутой на угол конусности $-2,5^\circ$ вокруг оси x .



Рисунок 3. Конечно-элементная модель рукава торсиона (вид сбоку)

КЭ модель рукава торсиона (рис. 2) насчитывает около 1,27 млн. элементов (и приблизительно 5,3 млн. степеней свободы) из них

приходится на элементы с материалом: Т-25 (0°) — 0,65 млн.; Т-25 (±45°) — 0,55 млн.; Р-181 — 0,06 млн. На элементы жестких связей — 0,01 млн.

Кинематические и статические граничные условия, накладываемые на КЭ модель торсиона воспроизводят поведение реальной конструкции. А именно, имитируют: неподвижное болтовое соединение комлевой части торсиона с втулкой несущего винта (заданы нулевые векторы перемещений узлов U_x, U_y, U_z , на поверхностях отверстий комлевой части (рис. 2)); действие лопасти на торсион в виде статически эквивалентных сосредоточенных сил и моментов.

Сосредоточенные силы и моменты, статически эквивалентные силовому действию лопасти на торсион, прикладывались к узлу, расположенному на оси торсиона и передавались на торсион с помощью жестких балочных КЭ связи (стрелки на рис. 2). В табл. 2 приведены нагрузки соответствующие азимутальным углам α 150° и 330° (рис. 4) при скорости полета 220 км/ч.

Таблица 2.

Нагрузки в зависимости от азимутального угла α

α , град	M_x , Н·м	M_y , Н·м	Q_x , Н	Q_y , Н	Q_z , Н
150	-3390,5	3500	3885,1	1357,3	161820,2
330	2859,6	1100	-4861,3	-2906,5	161892,0

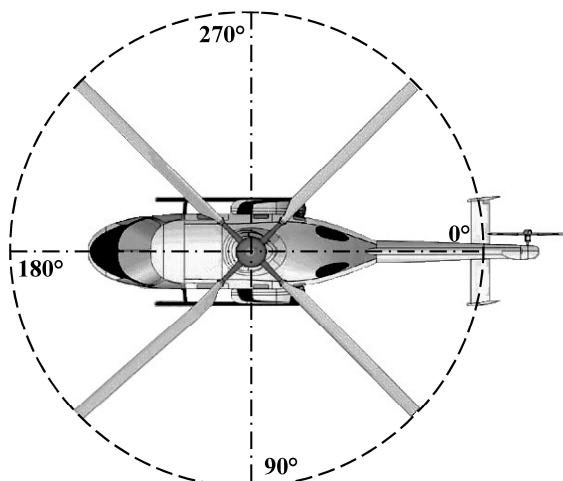


Рисунок 4. Схема вращательного движения несущего винта

При решении алгебраической системы уравнений, получаемой с помощью вариационного принципа и КЭ модели рукава торсиона, использовался метод сопряженных градиентов (PCG-решатель в ANSYS). Время счета одного варианта расчета составило около 1 ч.

В результате расчета параметров НДС исходного конструктивного исполнения рукава торсиона при полетной нагрузке (табл. 2) построены линии уровней полей напряжений, и перемещений с усреднением результатов по узлам (в работе не приводятся из-за ограничения по объему статьи). Расчеты показали, что при нагрузках, указанных в табл. 2, происходит изменение знака компонент перемещений, а также нормальных и касательных напряжений в комлевой и концевой частях торсиона за один оборот лопасти. Экстремальных значений в слоях резины напряжения достигали в комлевой и (или) концевой частях рукава торсиона.

С целью уменьшения напряжений влияющих на расслоение в резиновых слоях (рис. 1 г) предложен модифицированный вариант исполнения рукава торсиона. Модификация заключается в клиновидном изменении длины резиновых слоев в комлевой и концевой частях торсиона по их толщине (рис. 5). При этом укороченные резиновые слои аналогично исходной конструкции также продолжают слоями стеклопластика Т-25 ($\pm 45^\circ$).

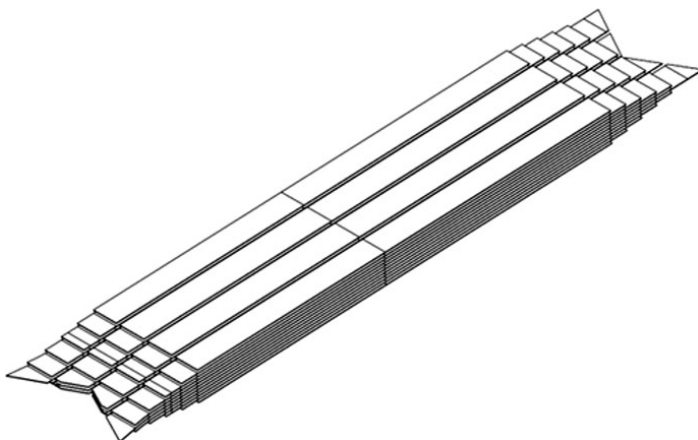


Рисунок 5. Слои резины P-181 в модифицированном варианте рукава торсиона

В табл. 3 приведены максимальные и минимальные значения перемещений U_x , U_y результатов расчетов, а также представлены повороты ω_z концевой части исходного и модифицированного торсионов при крутящем моменте в концевой части $M_z = 100$ Н·м.

Таблица 3.

Значения перемещений результатов расчетов

	Вариант геометрии (α , град.)			
	Исходный (150)	Модифицированный (150)	Исходный (330)	Модифицированный (330)
U_x	17,3	16,9	-12,1	-11,9
U_y	81,4	77,6	-103,8	-97,6
ω_z	Исходный		Модифицированный	
	0,341		0,308	

На основании результатов расчетов построены гистограммы минимальных и максимальных напряжений для исходного и модифицированного вариантов конструктивного исполнения рукава торсиона (рис. 6—8). Напряжения на рис. 6—8 указаны в МПа.

На основе результатов расчета, представленных в виде табл. 3 и гистограмм на рис. 6—8, можно сделать предварительные выводы по эффективности предложенных конструктивных изменений.

В модифицированном торсионе наблюдается: снижение максимальных положительных нормальных напряжений в резиновых слоях на величину $\sim 39\%$ и более на фоне незначительного увеличения касательных напряжений в этих слоях; снижение податливости концевой части торсиона при изгибе в плоскости вращения на величину $\sim 2\%$, при изгибе в плоскости взмаха на величину $\sim 6\%$, при кручении относительно оси торсиона на величину $\sim 9,7\%$.

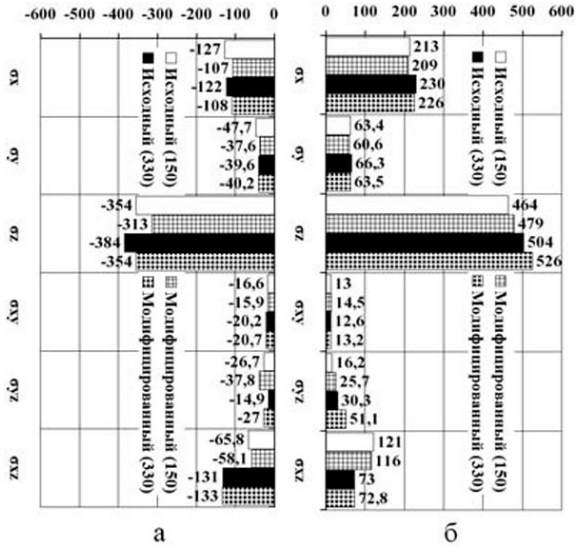


Рисунок 6. Гистограмма в слоях стеклопластика T-25 (0°):
 а — минимальных напряжений; б — максимальных напряжений

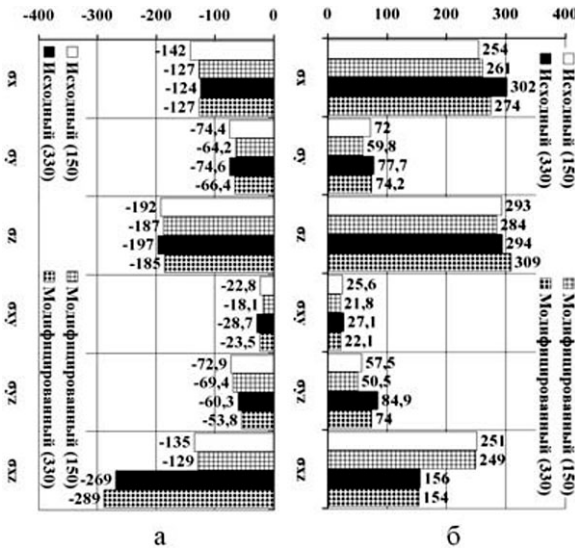


Рисунок 7. Гистограмма в слоях стеклопластика T-25 (±45°):
 а — минимальных напряжений; б — максимальных напряжений

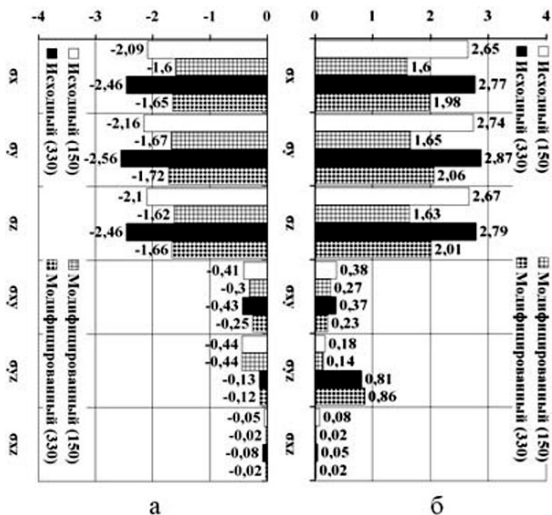


Рисунок 8. Гистограмма в слоях резины P-181
а — минимальных напряжений; б — максимальных напряжений

Список литературы:

1. Савинов В. И. Расчет напряженно-деформированного состояния композиционных стержневых конструкций несущей системы вертолета. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань: КГТУ, 1999. — 16 с.
2. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. — 640 с.

СЕКЦИЯ 3.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

НОВЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

Виноградов Константин Михайлович

к.т.н., доцент ЮУрГУ, г. Челябинск

E-mail: kasoft@mail.ru

При поддержке Совета по Грантам при Президенте РФ для государственной поддержки молодых ученых кандидатов наук.

Совершенствование технологии производства повышает требования к современному регулируемому электроприводу. Эти требования: большая перегрузочная способность, расширенный диапазон регулирования скорости (до 103—104), высокие динамические характеристики, интенсивное использование активных материалов, малые потери при простоте конструкции электрической машины, — могут быть обеспечены только в рамках системного подхода к разработке вентильного электропривода. При этом должны повышаться технологичность изготовления машины и исключаться затраты на дефицитные материалы, а качество регулировочных и энергетических характеристик электропривода должно повышаться. Всем вышеназванным требованиям удовлетворяет электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ). Если при конструировании электроустановки обратить большее внимание на новые типы электрических машин и в комплексе «преобразователь — двигатель» проектировать не преобразователь под традиционный двигатель с синусоидальным напряжением на статоре, а попытаться учесть особенности совместной работы электрической машины с источником питания, то можно добиться хороших результатов. Особое место в этом ряду занимают синхронные реактивные машины с независимым возбуждением (СРМНВ), которые характеризуются крайней простотой конструкции, не содержащим обмоток ротором, высоким КПД, большими удельными и перегрузочными моментами.

К синхронным реактивным машинам проявляется повышенный интерес из-за простоты их конструкции и технологичности

изготовления. В электрических машинах, имеющих традиционный «гладкий» статор и распределенную трехфазную обмотку, обычно стремятся увеличить отношение величины продольной индуктивности машины к поперечной. Это достигается или специальной формой штампа пакета ротора или продольной его шихтовкой [1; 2]. В явнополусной синхронной машине роль обмотки возбуждения может выполнить и обмотка, размещенная в пазах статора, если, во-первых, ее витки находятся напротив межполюсного промежутка ротора и, во-вторых, эта обмотка имеет полный шаг.

В электродвигателе одни и те же катушки обмотки статора поочередно выполняют роль то рабочих обмоток, то обмоток возбуждения. Если электрическая машина предназначена для работы в генераторном режиме, ключи коммутатора, подключенного к рабочим обмоткам, работают в режиме естественной коммутации. Поэтому можно разделить цепи рабочих обмоток, которые не требуют искусственной коммутации вентилей и, следовательно, могут быть подключены к неуправляемому выпрямителю, и цепи обмоток возбуждения, которые подключаются на выход управляемого преобразователя. Тем самым удаётся снизить габарит последнего. Наибольший выигрыш наблюдается в электромеханических установках, имеющих малое напряжение, например, 12 В или 28 В (бортовая сеть летательных аппаратов, автомобилей, тракторов, вездеходов).

Экспериментальные исследования позволили уточнить физику работы синхронной реактивной машины независимого возбуждения и сравнить её характеристики с другими электрическими машинами. Опытные исследования проводились на ряде электрических машин, отличающихся числом пар полюсов, номинальной мощностью. Результаты эксперимента показали, что рассматриваемый вариант реактивной машины с независимым возбуждением с учётом пульсаций лишь немного (примерно на 10%) уступает синхронному двигателю с обмоткой возбуждения на роторе. Каких-либо признаков ограничения (насыщения) величины момента от тока вследствие насыщения при больших перегрузках не наблюдалось, что следует признать большим преимуществом рассматриваемого электропривода при работе с механизмами, характеризующимися большими перегрузками по моменту. Экспериментальное сопоставление удельных силовых показателей асинхронного двигателя и СРМНВ при равных линейных нагрузках статора показало, что во втором варианте двигатель развивает момент примерно на 20% больше, чем асинхронный двигатель [4].

В [5] указывается на ещё большие (до 68 %) превышения величины номинального момента синхронной реактивной машины по сравнению с асинхронным двигателем, однако этот результат достигался

преднамеренным увеличением линейной нагрузки статора и удлинением его пазов, чтобы в конечном итоге сравнить две машины с равными суммарными (в обмотках статора и ротора) потерями в меди.

Исходя из того, что СРМНВ по функциональным и конструктивным признакам подобна наиболее распространенным типам электрических машин, была предложена методика её электромагнитного расчета с использованием современных типовых расчетов серийных электрических машин традиционных типов [1; 3]. Выбор главных геометрических размеров рекомендуется проводить, как в обычных асинхронных машинах. Силовая обмотка рассчитывается по аналогии с машинами постоянного тока. Обмотка якоря выполняется с полным шагом. Расчет зубцовой зоны выполняется по аналогии с машинами переменного тока. Полос ротора рассчитывается по аналогии с полюсом ротора синхронной явнополюсной машины, особенностью СРМНВ в этом случае является равномерный воздушный зазор вдоль полюсной дуги. Расчет магнитной цепи при холостом ходе проводится по аналогии с машинами переменного тока, при этом учитывается отсутствие в СРМНВ обмотки на роторе. Реакция якоря под нагрузкой и МДС обмотки возбуждения рассчитываются по методике, принятой для машин постоянного тока [3].

Электроприводы с СРМНВ требуют датчиков положения ротора, но схемы управления получаются такие же простые, как в электроприводах постоянного тока.

Возможность реализации больших перегрузочных моментов, эффективное использование активных материалов при простой системе управления делает электропривод с СРМНВ серьезным конкурентом лучшим традиционным регулируемым электроприводам переменного тока. По мере развития и совершенствования полупроводниковой элементной базы сфера применения этого электропривода будет расширяться.

При работе СРМНВ в генераторном режиме полезно отметить ряд преимуществ. Массивный ротор, обеспечивая достаточные жёсткость и механическую прочность, позволяет иметь угловые скорости вращения в десятки тысяч оборотов в минуту. Автономные установки для производства электроэнергии, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях, поэтому бесконтактное исполнение генератора является часто не только желательным, но обязательным условием конструирования. Известны разные варианты конструкции электрических генераторов для автономной сети. Обычно питание бортовой сети транспортных средств осуществляется от параллельно включенных аккумуляторной батареи и генератора постоянного тока, который приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. В качестве основного источника электроэнергии применяются коллекторные генераторы постоянного

тока, а также вентильные генераторы, имеющие ротор с постоянными магнитами. Наличие щеточно-коллекторного узла является главным недостатком коллекторных генераторов и приводит к снижению срока службы генератора, меньшей надежности, неблагоприятным массогабаритным характеристикам. Генераторы с постоянными магнитами характеризуются сложной технологией изготовления, нестабильностью параметров, повышенной мощностью устройств стабилизации выходного напряжения, большой стоимостью. Цепи рабочих обмоток в СРМНВ могут быть выполнены как по общеизвестной трехфазной мостовой схеме, так и по схеме «звезда — обратная звезда» с уравнивающим реактором. Хотя второй вариант и приводит к некоторому увеличению обмоточной меди, но при том же числе вентилялей, что и в мостовой схеме, позволяет получить двойной выпрямленный ток при в два раза меньшем суммарном падении напряжения на вентилялях выпрямительной схемы, что актуально для электроэнергетических установок, имеющих малое напряжение бортовой сети. Цепи возбуждения могут быть выполнены так же, как типовые схемы силовых цепей вентильно-индукторных двигателей.

Простота конструкции обеспечивает высокую технологичность изготовления электрической машины, бесконтактное исполнение в сочетании с «холодным» не содержащим обмоток ротором повышает надежность работы подшипников и всей машины, возможность выполнить ротор массивным (т.е. полюса ротора и вал из одной цельной заготовки) существенно повышают его прочность и поперечную жесткость, что позволяет получать высокие угловые скорости и большие перегрузки по моменту.

Список литературы:

1. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для вузов. — Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
2. Кононенко Е.В. Синхронные реактивные машины. — М.: Энергия, 1970.
3. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 2002. — 757 с.
4. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник ЮУрГУ. — 2001. — № 4 (04). — Серия «ЭНЕРГЕТИКА», Выпуск 1. — С. 70—76.
5. Law J.D., Chertok A., Lipo T.A. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Mashine // IEEE Trans. on Industry Applications. 1994, № 5. — p. 1185—1193.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПАКТНЫХ МОБИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ.

Усов Анатолий Фёдорович

к. т. н., ст. научный сотрудник ЦФТПЭС КНЦ РАН, г. Апатиты

E-mail: usov@admks.c.apatity.ru

Потокин Александр Сергеевич

аспирант КНЦ РАН, г. Апатиты

E-mail: student_noo@admks.c.apatity.ru

В данной статье предлагаются принципиально новые технические решения в создании зарядных устройств и средств генерирования высоковольтных импульсов, обеспечивающие существенное улучшение удельных энергетических и массогабаритных характеристик установок электроимпульсного разрушения материалов.

Потребности технического прогресса в горном деле и ряде других отраслей промышленности с технологиями, включающими процессы разрушения материалов, ставят задачи повышения технологической эффективности, снижения энергоёмкости разрушения, улучшения массогабаритных характеристик, обеспечения более простого управления процессом, более высокой экологической чистоты техники и технологии и т. п. К числу потенциально эффективных способов разрушения материалов относится электроимпульсный (ЭИ) способ разрушения материалов, основанный на использовании взрывного действия канала электрического разряда в твердом теле при выделении в нем энергии емкостного накопителя [11].

Способ отличается высокой энергетической эффективностью и уникальные технологические особенности, позволяющие его универсально использовать для бурения скважин различного диаметра и назначения, дробления и измельчения руд и технических материалов, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня [12].

В исследовательских работах по электроимпульсной технологии, когда главные задачи связывались с исследованием технологических

процессов, вопросы совершенствования электротехнического оборудования в сторону уменьшения его габаритов и веса всегда отходили на второй план. Сейчас, когда технологические процессы в значительной степени изучены, вопросы оптимизации электротехнического обеспечения технологии встают на первый план, и технологию уже не удовлетворяют аппараты на устаревшей элементной базе — громоздкие зарядные устройства и источники импульсного напряжения.

Как и российским опытными установками, апробированным в производственных условиях [4], предлагаемым зарубежным разработкам свойственны известные недостатки, сдерживающие широкое производственное использование новых ЭИ-процессов. Эти недостатки в основном связаны с неудовлетворительными удельными энергетическими и массогабаритными характеристиками электроимпульсных установок и, прежде всего, относящиеся к электротехническому обеспечению способа [6–10].

Электротехническая часть установок включает в себя два относительно самостоятельных блока: зарядное устройство с элементами, позволяющими управлять процессом заряда и частотой следования импульсов, и генератор импульсов высокого напряжения на основе разряда емкостного накопителя энергии (рис.1).

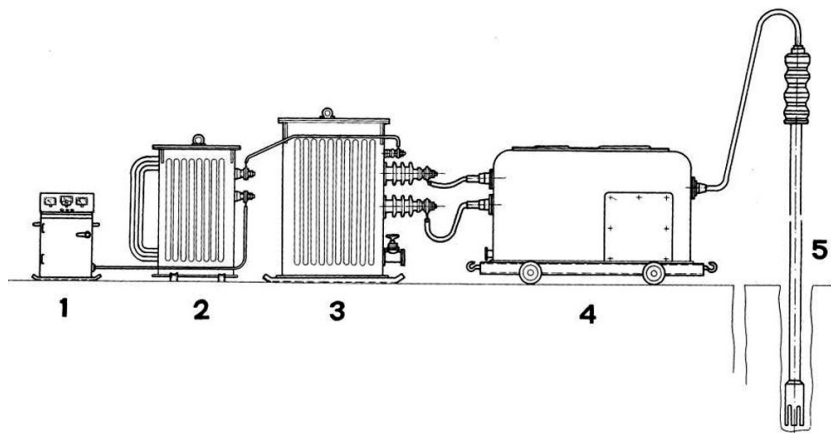


Рисунок 1. Блок-схема электроимпульсной установки

1 — пульт управления, 2 — блок регулирования зарядного процесса, 3 — повысительно-зарядный блок, 4 — генератор импульсов, 5 — технологический блок.

Спецификой работы электротехнического оборудования в электроимпульсной технологии является применение высоких напряжений (350—500 кВ и выше) и динамический режим работы емкостного накопителя энергии: заряд-разряд на малоомную нагрузку, каким является канал разряда, с высокой частотой следования импульсов (оптимально до 20—30 импульсов в секунду).

Зарядное устройство

Зарядное устройство для реализации ЭИ способа должно обеспечивать требуемое напряжение и мощность, давать возможность регулирования частоты следования импульсов, обладая при этом высоким КПД и $\cos \varphi$. Для установок электроимпульсной технологии, использующих в качестве источников импульсов ГИН и ИТ, принципиально подходят большинство типов зарядных устройств, разработанных для других электроразрядных и иных технологий, в которых основным накопителем энергии является конденсаторная батарея.

Начало работ по электроимпульсным технологиям относится ко времени, когда только начиналось освоение полупроводниковой техники. В исследовательских установках еще использовались кенотроны, затем селеновые вентили. Кольским научным центром (КНЦ) РАН (тогда Кольский филиал АН СССР) к разработке выпрямительных устройств для технологических установок были привлечены организации электротехнической промышленности с ориентацией на использование все более совершенных полупроводников с более высоким КПД выпрямления. С учетом требуемого для ЭИ технологий уровней импульсного напряжения (300 кВ и выше) предпочтительный уровень зарядного напряжения определялся в диапазоне 50—100 кВ, а максимальная мощность зарядных устройств в большинстве случаев могла быть ограничена величиной 100–250 кВт. Для целей ЭИ-технологий по заданиям КНЦ РАН в 1960–1980 гг. Московским электрозаводом им. Куйбышева (МЭЗ) и Тольяттинским филиалом Всесоюзного энергетического института (ТФ ВЭИ) был разработан ряд зарядных устройств, испытанных на технологических установках КНЦ:

Блок ВТМ 27/45 — РНТМ 78/05 — (Московский электрозавод им. Куйбышева) — включает трансформатор-выпрямитель ВТМ 27/45 (27 кВт, 45 кВ, селеновые столбы типа 15ГЕ) и дроссель насыщения с подмагничиванием РНТМ 78/0.5 (78 кВА, максимальный фазный ток 120 А, пределы изменения фазной индуктивности дросселя от 0.05 до 0.01 Гн при изменении тока подмагничивания от 0 до 5 А).

КВТМ-75/2х50-76У2 РНРМ-100/0.5 (Московский электрозавод им. Куйбышева) — включает трансформатор-выпрямитель *КВТМ-75/2х50* (75 кВт; ± 50 кВ; средний выпрямленный ток 0.75 А., кремниевые диоды) и дроссель насыщения с подмагничиванием РНРМ-100/0.5 (встроенный, 100 кВа, регулирование индуктивности дросселя в пределах 0.02—0.002 Г, регулирование скорости заряда в пределах от 1 до 20 Гц с кпд 0.9 и $\cos\phi$ 0.8)

Зарядное устройство ЗУ-400 (Тольяттинский филиал ВЭИ) — номинальная мощность 58 кВа, выпрямленное напряжение 40-60 кВ со ступенью регулирования 5 кВ; номинальный выпрямленный ток 0.6 А, селеновые столбы типа 15 ГЕ. Предусматривает раздельное регулирование уровня напряжения и скорости заряда переключением числа витков обмотки низкого напряжения трансформатора и изменением числа витков линейной индуктивности в фазах трансформатора со стороны НН в диапазоне от 0.05 до 0.005 Г, регулирование скорости заряда в пределах от 1 до 10 Гц.

Созданные ЗУ по номиналам напряжения и мощности, возможности управления скоростью заряда удовлетворяли требованиям установок для электроимпульсных технологий, но имели большой вес и габариты, свойственные схемам выпрямления с повышением переменного напряжения промышленной частоты трансформаторами на железе. Поэтому революционный прорыв в выпрямительной технике, произошедший в последние два десятилетия, переносит эти достижения в область истории разработки ЭИ способа.

Последние достижения в технологии изготовления источников питания высокого напряжения по схеме высокочастотного преобразования напряжения (ВЧП) обеспечили существенное (на порядок и более) уменьшение их габаритных размеров, массы и рост КПД энергопреобразования по сравнению с их аналогами, которые выпускались всего десятилетие назад. Приборы этого нового класса обычно работают на высоких частотах в диапазоне от 20 до 100 кГц и практически вытеснили все прежние модели источников питания в промышленности, которые работали от сети переменного тока, в том числе даже модели с высоким уровнем выходной мощности. Разработанное в КНЦ РАН для исследовательских целей зарядное устройство на 50 кВ, 2 кВт представлено на рис. 2.



Рисунок 2. Зарядное устройство по схеме высокочастотного преобразования напряжения

При размерах 480 x 480 x 210 мм и весе 30 кг удельные характеристики соответственно равны 24 дм³/кВт и 15 кг/кВт против 176 дм³/кВт и 120 кг/кВт для достаточно мощного (75 кВт) выпрямителя КВТМ-75/2х50-76У2 — РНРМ-100/0.5. (Данное зарядное устройство разработано при активном участии сотрудников Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН Данилина А.Н., Колобова В.В., Селиванов В.Н., Баранника М.Б. и Прокопчука П.И.).

Генерирование высоковольтных импульсов

В исследовательских и технологических электроимпульсных установках генерирование импульсов для процессов ЭИ в основном базировалось на использовании относительно надежной, но большой по габаритам многоступенчатой (5—6 ступеней) схемы генератора Аркадьева — Маркса. Низкие удельные характеристики по габаритным параметрам генератора импульсов обусловлены очень высоким уровнем напряжения (сотни киловольт). При этом габариты установки определяются не только и не столько габаритами электротехнического оборудования, сколько большими изоляционными промежутками до ограждений, которые вынужденно выдерживаются в конструкции установки. Одним из путей улучшения удельных энергетических (энергогабаритных) характеристик источников импульсов в установках ЭИ технологиях является применение импульсных трансформаторов (ИТ). Оно главным образом преследует цель уменьшения габаритов установок

за счет исключения многокаскадных ГИН, представляя накопитель энергии единичным элементом.

В КНЦ РАН опробованы несколько вариантов ИТ, отличающиеся схемой и типом материала магнитопровода, позволившие существенно уменьшить размеры генераторов импульсов. Тольяттинским филиалом ВЭИ по заданию КНЦ РАН разработан макетный 4-каскадный ИТ с магнитопроводом из трансформаторной стали (рис. 3).

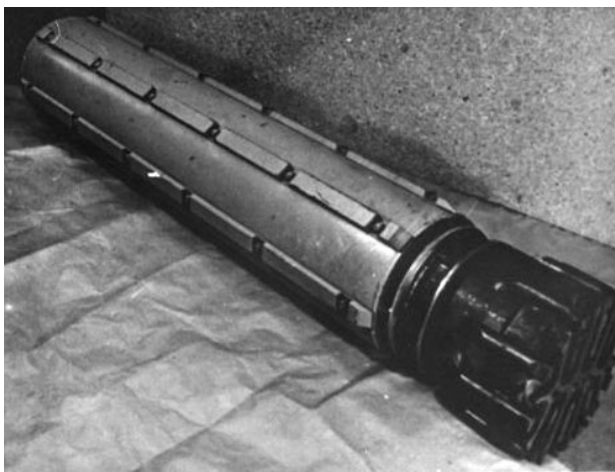


Рисунок 3. Буровое устройство с каскадным импульсным трансформатором

Габариты генератора, предназначенного для установки бурения скважин с промывкой водой при буровом наконечнике диаметром 400 мм, позволяют разместить его непосредственно в скважине перед буровой коронкой. В подобных случаях решаются многие проблемы, связанные с передачей на забой импульсов высокого напряжения, причем не столько по причине деформации импульса, сколько из-за проблем с обеспечением электрической прочности передающей системы. В схеме с погружным ИТ амплитуда канализируемого к забою импульса напряжения снижается с 300—400 до 50 кВ. Однако схема генератора многокаскадного ИТ обладает тем недостатком, что при разряде накопительной емкости через ИТ предельная мощность импульса невелика вследствие высокого волнового сопротивления цепи разряда. По той же причине сечение железа сердечника ИТ имеет значительные размеры. В НИИ электрофизической аппаратуры (НИИ

ЭФА) им. Ефремова, г. Санкт-Петербург по заданию КНЦ РАН был разработан однокаскадный ИТ, нагружаемый на контур обострения фронта высоковольтных импульсов с обостряющим конденсатором на напряжение 400 кВ (рис. 4).



Рисунок 4. Однокаскадный импульсный трансформатор

Целесообразно рассматривать данный вариант схемы как путь для дальнейшего снижения веса ИТ, сочетая использование материалов с высокой магнитной проницаемостью с оптимизацией параметров разрядного контура для обеспечения максимального к.п.д. передачи энергии из первичного контура импульсного трансформатора в канал разряда породоразрушающего устройства с требуемым режимом выделения энергии [9]. Схема обострения фронта импульсов за счет перераспределения энергии между разрядной и обостряющей емкостями также дает дополнительные возможности для регулирования энергвыделения в канале разряда в целях достижения максимального разрушающего эффекта разряда. А если этого недостаточно, то комбинированные схемы генераторов импульсов с двумя источниками энергии позволяют независимо оптимизировать формирование импульса напряжения на нагрузке до пробоя в разрядном промежутке и режим энерговклада в канал разряда с целью энергетической оптимизации процесса электроимпульсного разрушения. На рис. 5 приведен макетный вариант ИТ на ферритовых кольцах 2000 НМ, обеспечивающий зарядку обострителя до 350 кВ.

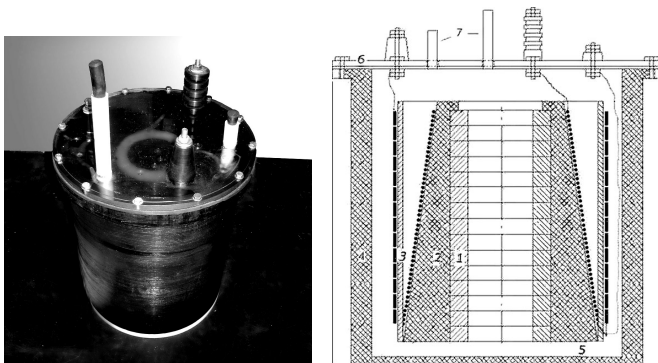


Рисунок 5. Макетный образец ИТ — 50/350
коэффициент трансформации — 7, выходное напряжение 350 кВ;
 1 — ферритовых колец 100x60x15-15 шт., 2 — вторичная обмотка,
 3 — первичная катушка, 4 — бак (изоляционный), 5 — опора,
 6 — крышка (изоляционная), 7 — маслозаливные трубки.

Благодаря нашей высокой активности в постановке и обсуждении электротехнических проблем электроимпульсного способа разрушения материалов к этой проблеме возник интерес со стороны научных организаций из смежных отраслей высоковольтной электротехники и это приносит свои плоды. В этом плане следует отметить работы НИИ ядерной физики, НИИ высоких напряжений ТПУ, IT & AC Ltd., Japan (Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий [14] и ИСЭ СО РАН [2]). Предложенные решения по схемам генерирования импульсов могут рассматриваться альтернативными, равнозначно эффективными в определенных диапазонах широкого спектра применения способа.

Таким образом, в настоящее время возникли реальные технические предпосылки для создания компактных и энергетически эффективных электротехнологических комплексов. Учитывая широкую гамму технологических применений способа и диапазон энергетических режимов, предлагается поэтапное рассмотрение и решение проблемы восхождением от простого к сложному. На первом этапе исследования новых технических решений предлагается проверить и отработать на установках ограниченной производительности, соответствующих запросам и отвечающих требованиям определенных отраслей, а уже далее перейти к реализации адаптированных решений на более мощных установках и по более широкому спектру перспективных направлений использования. В основу стратегии дальнейшего совершенствования электротехнического оборудования для электроимпульсной технологии для существенного улучшения удельных энергетических и массогабаритных характеристик электроимпульсных установок предлагается использование следующих технических решений: 1 — использование при

создании зарядного устройства схем высокочастотного преобразования напряжения, 2 — использование в схеме генерирования импульсов импульсных трансформаторов с магнитопроводом из материала с высокой магнитной проницаемостью, 3 — использование схемы обострения фронта импульсов напряжения, 4 — исполнение обостряющих конденсаторов на воде и иных жидких диэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью.

Список литературы:

1. Воробьев А. А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971.
2. Канаев Г. Г., Кухта В. Р., Лопатин В. В., Нашилевский А. В., Ремнев Г. Е., Уетуга К., Фурман Э. Г.. Приборы и техника эксперимента № 1, Январь-Февраль 2010, 105—109 с.
3. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002, 324 с.
4. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. — Апатиты: КНЦ РАН, 1995.
5. Усов А.Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд. Известия РАН, Энергетика. 2001. № 1, 54—62 с.
6. Усов А.Ф., Бородулин В.В. Проблема улучшения удельных массогабаритных и энергетических характеристик технических средств электроимпульсного разрушения материалов. Горный информационно-аналитический бюллетень №9, 2010, 375—379 с.
7. Усов А.Ф., Гладков В.С. Вопросы электротехнического обеспечения технологий электроимпульсного разрушения материалов источниками высоковольтных импульсов. Вестник НТУ «ХПИ», г. Харьков, — в. 35, 2004, 143—154 с.
8. Усов А.Ф., Потокин А.С. О стратегии разработки и освоения электротехнического оборудования для технологий электроимпульсного разрушения материалов. Труды Всероссийской конференция по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2011, Петрозаводск, 21—27.06.2011, 62—66 с.
9. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии — Л.: — Наука, 1987, 179 с.
10. Усов А.Ф., Цукерман В.А., Бородулин В.В., Приютов Ю.М. Лабораторный электроимпульсный дезинтегратор КЛЭИД эффективный инструмент для изучения минерального сырья. Горный информационно-аналитический бюллетень №3, 2008, 130—135 с.
11. Andres, U. 1995. Electrical disintegration of rock, Mineral Proc. Extractive Metallurgy Rev., 14: 87—110, 225 с.
12. Biela J., Marxgut C., Bortis D. and Kolar J.W. Electric Discharge Drilling of Concrete., Proceeding of the IEEE International Power Modulator Conference, May 27-31, Las Vegas, NV, 2008, 276 с.
13. Inoue, H. et al. 2000. Drilling of hard rocks by pulsed power. Inoue, H. Lisitsyn, I.V. Akiyama, H. Nishizawa, I. In Electrical Insulation Magazine, IEEE Volume: 16, Issue: 3, 2000 pp. 19—25 pp.
14. Kovalchuk, A. V. Kharlov, V. A. Vizir, V. V. Kumpyak, V. B. Zorin, and V. N. Kiselev. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks. Rev. Sci. Instrum. 81, 103506 (2010); doi:10.1063/1.3497307.

СЕКЦИЯ 4.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

Андросик Андрей Борисович

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

Воробьев Сергей Андреевич

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

Мировицкая Светлана Дмитриевна

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

E-mail: vorsa_57@mail.ru

В задачах вычислительной фотоники широко используются различные подходы к решениям уравнений Максвелла посредством электромагнитных симуляторов или вычислителей поля. Моделирование поля можно применить для проведения реалистичного эквивалентного моделирования электромагнитных структур [1, с. 26]. На рис.1 приведены основные типы и особенности методов анализа, которые используются для решения задач интегральной фотоники.

Аналитические методы (рис.2) — решения волноводных задач в закрытой форме с точки зрения аналитических функций. Выражения могут быть найдены только для нескольких специальных конфигураций (например, в прямоугольных, эллиптических или сферических волноводах и резонаторах) [2, с. 38]. Несмотря на их ограниченную практическую применимость, аналитические решения чрезвычайно полезны с целью утверждения численных методов, поскольку они обеспечивают безошибочные справочные решения.

Полуаналитические методы (рис.3) были развиты до появления мощных компьютеров. Они используют обширную аналитическую обработку задач поля. Это приводит к сложному интегралу, бесконечному ряду, вариационной формуле, асимптотическому приближению, то есть, к выражению, требующему количественного решения заключительной вычислительной обработки. Предвари-

тельная аналитическая обработка часто приводит к довольно быстрым и эффективным компьютерным алгоритмам, но получающиеся программы обязательно специализированы, поскольку первоначально в формулировку были включены определенные типы граничных и материальных условий.

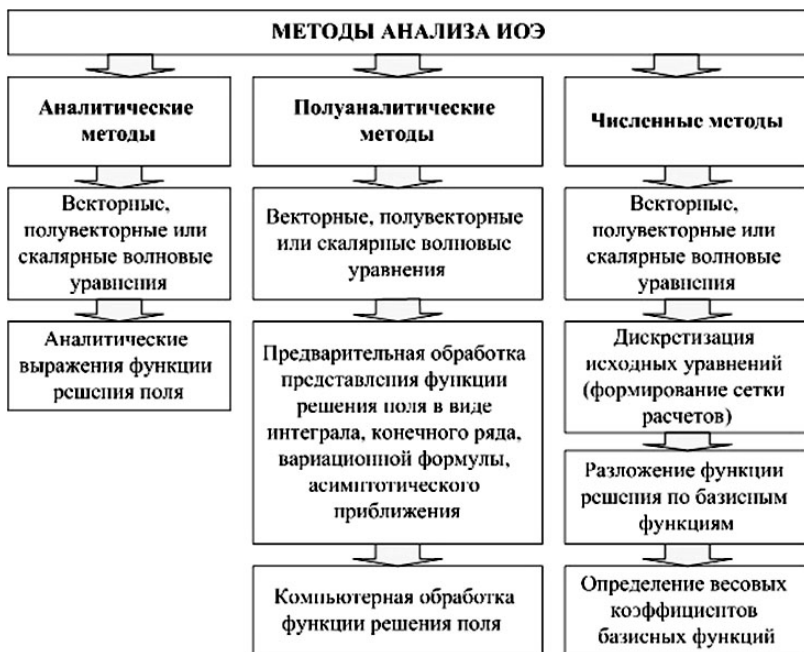


Рисунок 1. Основные типы методов анализа



Рисунок 2. Аналитические методы

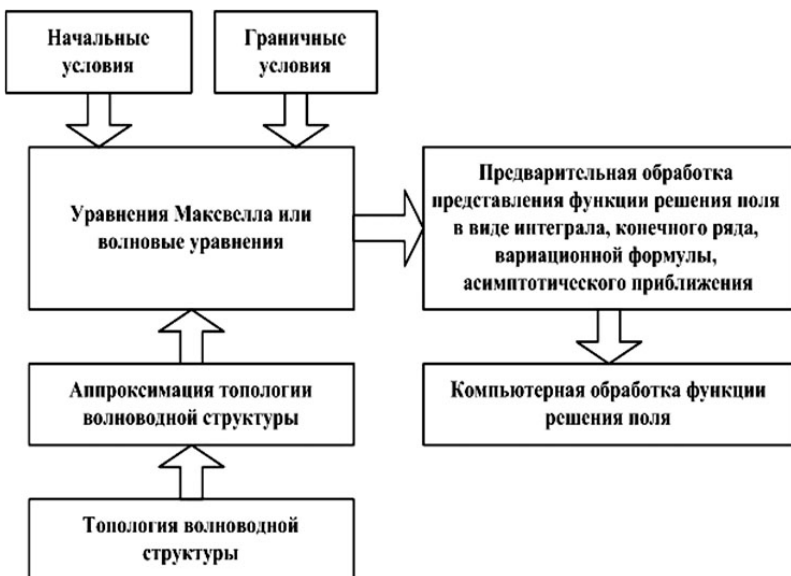


Рисунок 3. Полуаналитические методы

Необходимо отметить, что аналитические и полуаналитические методы анализа можно рассматривать в общем виде. Это связано с тем, что чисто аналитические методы используются для решения только узкого круга простейших задач. Полуаналитические методы основаны на определенной аппроксимации структуры в процессе рассмотрения с последующим получением аналитического решения упрощенных задач. Полуаналитические методы широко используются при моделировании оптоэлектронных волноводов, таких как углубленные и ребристые волноводы, конусы и направленные ответвители [3, с. 58]. Число полуаналитических методов быстро увеличивается, появляются новые методы и совершенствуются уже существующие. Примеры полуаналитических методов расчета волноводных структур приведены на рис.4.

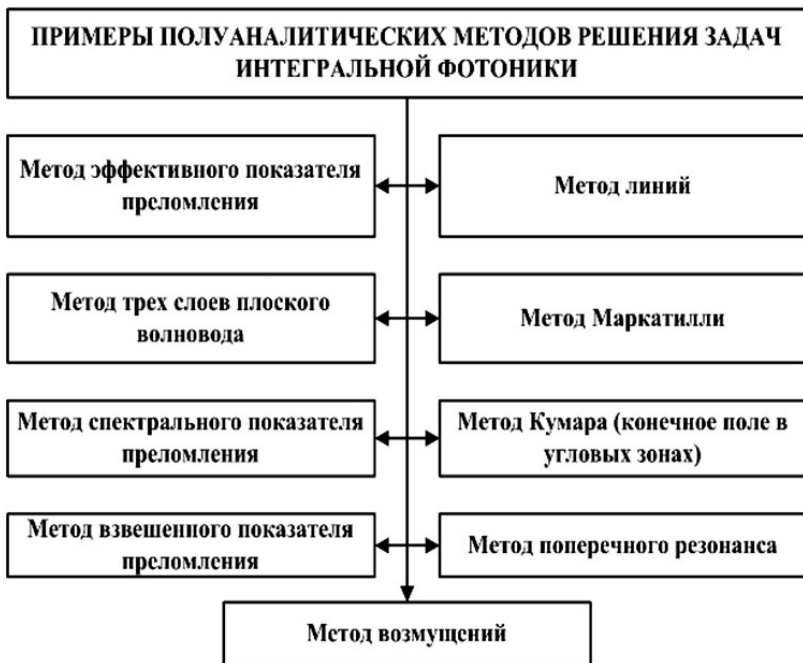


Рисунок 4. Основные виды полуаналитических методов решения задач интегральной фотоники

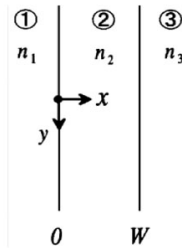
Метод трех слоев плоского волновода. Один из наиболее простых полуаналитических методов (рис.5). Полагается, что структура волновода однородна вдоль осей y и z . Тангенциальные составляющие поля связаны на границе между средами, поэтому возможно использовать волновые уравнения Гельмгольца для описания однородных сред.

Метод Маркатилли. Этот метод является одним из первых полуаналитических методов для анализа углубленных волноводов и разветвителей. (рис.6).

Метод был разработан для направляющих структур больших размеров, для которых разность показателей преломления между сердцевиной и оболочкой материала небольшая, менее 5%. С учетом этого, поле предполагается существующим только в области сердцевины волновода и в четырех соседних областях оболочки, которые распространяются в ширину и глубину волновода до бесконечности. Во всех других областях считается, что поле

пренебрежимо мало и принимается равным нулю. Кроме того, предполагается синусоидальное изменение поля в области сердцевины и экспоненциальное в четырех областях оболочки эквивалентной структуры, что используется для разделения общего поля на поля от двух волноводных пластин — вертикальной и горизонтальной. Два трансцендентных уравнения для каждого волновода решаются совместно для получения константы осевого распространения.

Исходная структура



Исходное волновое уравнение для ТЕ мод

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2) \cdot E_y = 0$$

$$k_0^2 = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}$$

Составляющие поля E_y Составляющие поля H_z

Область 1	$C_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot x}$	$\frac{-\gamma_1}{j \cdot \omega \cdot \mu_0} \cdot C_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot x}$
Область 2	$C_2 \cdot \cos(\gamma_2 \cdot x + \alpha)$	$\frac{\gamma_2}{j \cdot \omega \cdot \mu_0} \cdot C_2 \cdot \sin(\gamma_2 \cdot x + \alpha)$
Область 3	$C_3 \cdot e^{-\gamma_3 \cdot (x-W)}$	$\frac{\gamma_3}{j \cdot \omega \cdot \mu_0} \cdot C_3 \cdot e^{-\gamma_3 \cdot (x-W)}$
	$\gamma_1 = k_0 \cdot \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}$	$\gamma_2 = k_0 \cdot \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}$
		$\gamma_3 = k_0 \cdot \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}$

Исходное волновое уравнение для ТМ мод

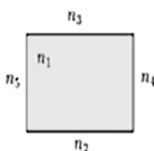
$$\frac{d^2 H_y}{dx^2} + k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2) \cdot H_y = 0$$

Составляющие поля E_z Составляющие поля H_y

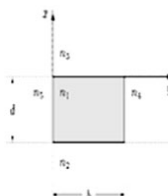
Область 1	$\frac{\gamma_1}{j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot C_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot x}$	$C_1 \cdot e^{\gamma_1 \cdot x}$
Область 2	$\frac{-\gamma_2}{j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot C_2 \cdot \sin(\gamma_2 \cdot x + \alpha)$	$C_2 \cdot \cos(\gamma_2 \cdot x + \alpha)$
Область 3	$\frac{\gamma_3}{j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot C_3 \cdot e^{-\gamma_3 \cdot (x-W)}$	$C_3 \cdot e^{-\gamma_3 \cdot (x-W)}$
	$\gamma_1 = k_0 \cdot \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}$	$\gamma_2 = k_0 \cdot \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}$
		$\gamma_3 = k_0 \cdot \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}$

Рисунок 5. Метод трех слоев плоского оптического волновода

Исходная структура волновода



Эквивалентная структура волновода



Уравнения Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial y^2} + (\beta_v^2 - \beta_z^2) \underline{E}_z = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + (\beta_v^2 - \beta_z^2) \underline{H}_z = 0$$

v - индекс области

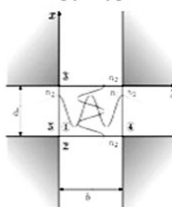
Решения для E_{mn}^x моды в области 1

$$E_{1x} = jA_1 \frac{\beta_y' + \beta_z'}{\beta_x \beta_z} \sin[\beta_x(x+x_0)] \cos[\beta_y(y+y_0)]$$

$$E_{1y} \approx 0$$

$$E_{1z} = A_1 \cos[\beta_x(x+x_0)] \cos[\beta_y(y+y_0)]$$

Распределение поля в эквивалентной структуре



Решения для E_{mn}^x моды в области 2, аналогичные решения для областей 3, 4 и 5

$$E_{2x} = A_2 \frac{\beta_y^2 + \beta_z^2}{\beta_{x2} \beta_z} \cos[\beta_y(y+y_0)] e^{|\beta_{x2}|(x+d)}$$

$$E_{2y} \approx 0$$

$$E_{2z} = A_2 \cos[\beta_y(y+y_0)] e^{|\beta_{x2}|(x+d)}$$

Определение постоянных

растяжения

$$\text{tg}(\beta_x d) = jn_1^2 \beta_x \frac{n_2^2 \beta_{x3} + n_3^2 \beta_{x2}}{n_2^2 n_3^2 \beta_x^2 + n_1^2 \beta_{x2} \beta_{x3}}$$

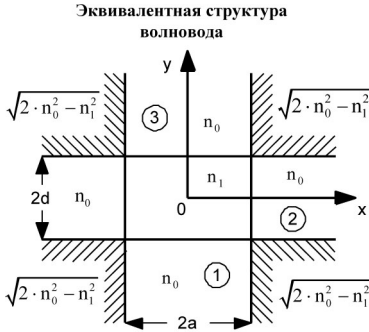
$$\text{tg}(\beta_y b) = j\beta_y \frac{\beta_{y4} + \beta_{y5}}{\beta_y^2 + \beta_{y4} \beta_{y5}}$$

$$\beta_{x2,3} = -j\sqrt{\beta_1^2 - \beta_{2,3}^2 - \beta_x^2}, \quad \beta_{y4,5} = -j\sqrt{\beta_1^2 - \beta_{4,5}^2 - \beta_y^2}$$

Рисунок 6. Метод Маркатилли

Метод Маркатилли не обеспечивает хороших результатов для волноводов, работающих вблизи области отсечки.

Метод Кумара. Метод Кумара является усовершенствованием метода Маркатилли, учитывающим конечное поле в угловых зонах (рис.7).



Распределение показателя преломления

$$n^2(x, y) = N_x^2(x) + N_y^2(y) + O(n_1^2 - n_0^2)$$

$$N_x^2(x) = \begin{cases} n_1^2 / 2 & |x| \leq a \\ n_0^2 - n_1^2 / 2 & |x| > a \end{cases}$$

$$N_y^2(y) = \begin{cases} n_1^2 / 2 & |y| \leq d \\ n_0^2 - n_1^2 / 2 & |y| > d \end{cases}$$

Волновое уравнение

$$\nabla^2 f + (k^2 n^2 - \beta^2) f = 0$$

$$\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$$

Постоянная распространения

$$\beta^2 = (k^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2) + \frac{k^2 (n_1^2 - n_0^2) \cos^2(k_x a - \phi) \cos^2(k_y d - \psi)}{(1 + \gamma_x a)(1 + \gamma_y d)}$$

Нормированная постоянная распространения

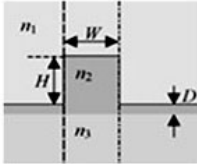
$$b = 1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{k^2 (n_1^2 - n_0^2)} + \frac{\cos^2(k_x a - \phi) \cos^2(k_y d - \psi)}{(1 + \gamma_x a)(1 + \gamma_y d)}$$

Рисунок 7. Метод Кумара

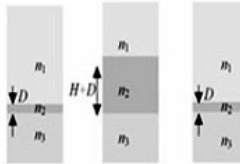
Метод эффективного показателя преломления. Метод Маркатилли был в дальнейшем развит и преобразован в метод эффективного показателя преломления, вскоре ставшим одним из самых популярных методов анализа оптических волноводов. В этом методе эффективный показатель преломления структуры получается путем решения двух трансцендентных уравнений для волноводных пластин (рис.8).

Простота и быстрота метода привлекли исследователей к разработке различных модификаций (рис.9), которые позволили повысить точность метода эффективного показателя. Было развито много различных вариантов метода, таких как метод эффективного показателя, базирующийся на линейной комбинации решений, с коррекцией возмущения или вариационный метод эффективного показателя, разработанный специально для анализа ребристых волноводов.

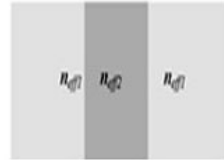
Исходная структура



Расчет вертикальной структуры, для определения n_{eff} и $n_{eff,z}$



Расчет горизонтальной структуры, для определения n_{eff}



Исходное уравнение

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + (n(x, y)^2 k^2 - \beta^2) E = 0$$

Представление поля

$$E = E_0 \phi(y) \psi(x) e^{j\beta z}$$

Система уравнений

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = E_0 \phi(y) e^{j\beta z} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \frac{E}{\psi(x)} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = E_0 \psi(x) e^{j\beta z} \frac{\partial^2 \phi(y)}{\partial y^2} = \frac{E}{\phi(y)} \frac{\partial^2 \phi(y)}{\partial y^2}$$

Уравнение расчета

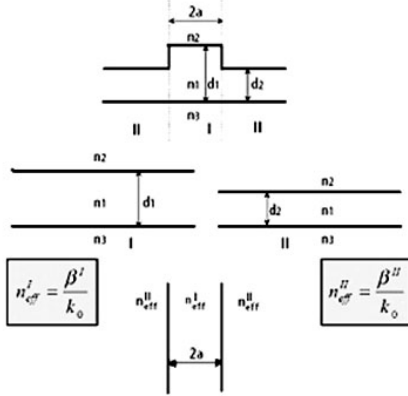
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - (\beta_{eff}^2(x) - \beta^2) \psi = 0$$

$n_{eff,I}$	$n_{eff,II}$	$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - (\beta_{eff}^2(x) - \beta^2) \psi = 0$
I	II	$n_{eff,I} \quad \beta = kn_{eff}$
		$n_{eff} = \frac{\beta}{k} = \frac{\beta \lambda}{2\pi}$

Рисунок 8. Метод эффективного показателя преломления

Метод возмущений. Метод возмущений (рис.10) позволяет обеспечить лучшую аппроксимацию профиля показателя преломления, чем методы эффективного показателя. В процессе моделирования волноводной структуры вычисляется возмущение показателя преломления, а также возмущение распределения электромагнитного поля.

Схема определения постоянной распространения трехмерного волновода



Обобщенный метод эффективного показателя преломления

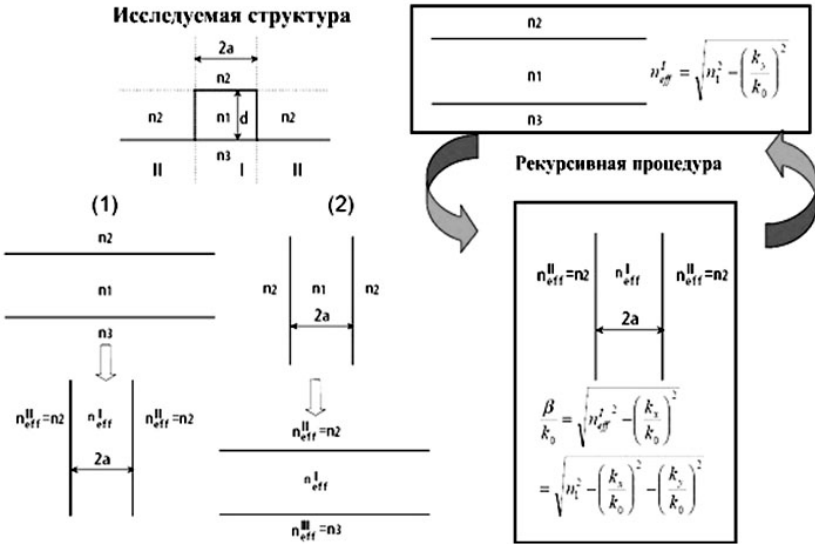
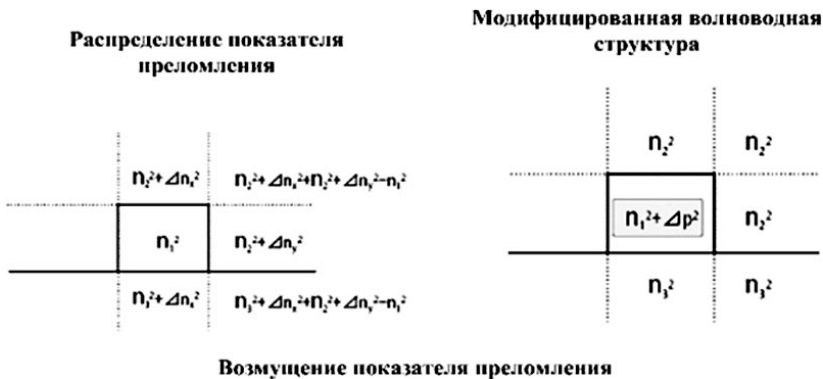


Рисунок 9. Модификации метода эффективного показателя преломления



$$\Delta n_x^2 = \left(\frac{k_x}{k_0} \right)^2 \qquad \Delta n_y^2 = \left(\frac{k_y}{k_0} \right)^2$$

Возмущение распределения поля

$$\Delta_p^2 = \frac{k_0^2 \int_S |f(x)g(y)|^2 \delta n^2 dS}{\int_S |f(x)g(y)|^2 dS}$$

Рисунок 10. Метод возмущений

Метод спектрального показателя преломления. Возрастающее использование ребристых волноводов в качестве базового носителя сигнала, также как их использование в устройствах связи, деления, фокусировки, соединения, фильтрации, усиления, модуляции и генерации дают толчок для разработки методик повышения точности полуаналитических методов расчета. Одним из достижений является метод спектрального показателя преломления, предложенный для анализа ребристых волноводов с воздушной оболочкой (рис.11). Переход оптического поля из полупроводника в воздух моделируется с использованием сдвига Гуса-Хансена, объединенного с нулевым граничным условием. Исследуемая открытая структура заменяется несколько большей, частично закрытой, которую легко анализировать; решения для такой структуры близко аппроксимируют аналогичные для реальной структуры.

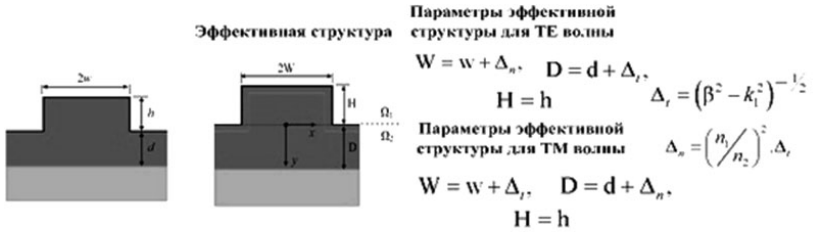
Метод спектрального анализа решает скалярное волновое уравнение как для самого гребня, так и для области ниже него. При

нахождении решения для поляризованного случая, вводятся основные компоненты поля, для которых эффективные ширины, соответствующие вариационным граничным условиям, удовлетворяются адекватно. Волновое уравнение решается непосредственно для гребня и выражается в раздельной форме. В области ниже гребня для снижения мерности проблемы используется Фурье-преобразование; поле выражается в спектральной области с использованием Фурье-преобразования. Поля в основании гребня полностью согласуются, но допускается неоднородность градиента поля, которая минимизируется, что приводит к трансцендентному уравнению для β , имеющему эффективное решение.

Развитием метода спектрального показателя преломления стал дискретный метод спектрального показателя, который использует ряды Фурье в действительной области для поля ниже гребня и является очень экономичным по затратам компьютерного времени, хотя ограничивает поля в горизонтальном направлении. Метод был также развит на случай соединения ребристых волноводов, многослойных в ребре и под ним, на случаи с потерями и усилением, а также при вытекающих модах.

Методы, использующие Фурье-преобразование. Техника Фурье преобразования является специальной группой полу-аналитических методов, использующих преобразование Фурье в процессе решения уравнений Максвелла. Наиболее интересны вариационный метод, использующий обобщенное Фурье преобразование и метод оператора Фурье.

Эти методы используются для решения обобщенной планарной многослойной структуры с любым распределением показателя преломления. Оба метода разделяют многослойную структуру на три раздельных вертикальных области как в методе трех слоев.



Основное уравнение для области Ω_1

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + [k^2(x, y) - \beta^2] E = 0$$

Основное уравнение для области Ω_2

$$\frac{\partial^2 \phi(s, y)}{\partial y^2} + \{k^2(y) - s^2 - \beta^2\} \phi(s, y) = 0$$

$$\phi(s, y) = \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) e^{-s x} dx$$

$$E(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(s, y) e^{s x} ds$$

Вариационное граничное условие

$$\beta^2 = \frac{\iint_{\Omega} \left[k^2 |E|^2 - \left| \frac{\partial E}{\partial x} \right|^2 - \left| \frac{\partial E}{\partial y} \right|^2 \right] dx dy}{\iint_{\Omega} |E|^2 dx dy}$$

Описание поля в области Ω_1

$$E = \cos(s_1 x) \frac{\sin(\gamma_1(y+H))}{\sin(\gamma_1 H)} \quad \gamma_{1,2} = \left(k^2 - s_{1,2}^2 - \beta^2 \right)^{1/2}$$

Спектральный показатель преломления

$$n_s = \left(n^2 - \frac{s^2}{k_0^2} \right)^{1/2}$$

Уравнение для определения постоянной распространения

$$\gamma_1 \cot(\gamma_1 H) = \frac{2 s_1^2}{\pi W} \int_{\Gamma} \frac{\cos^2(sW)}{(s_1^2 - s^2)} ds$$

$$\phi(s, y) = f(s)g(s, y)$$

$$f(s) = \int E(x) e^{-s x} dx = \frac{2n_1 \cos(sW)}{s_1^2 - s^2}$$

$$g(s, y) = \frac{\sin(s(y+H))}{\sin(sH)}$$

$$b^2 = \frac{\beta^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_1^2}$$

Рисунок 11. Метод спектрального показателя преломления

Список литературы:

1. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Основы волноводной фотоники. — М.: МГОУ, 2009. 246 с.
2. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Математические основы волноводной фотоники. — М.: МГОУ, 2010. 224 с.
3. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Математические основы волноводной фотоники. — М.: МГОУ, 2011. 370 с.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФОТОННЫХ СТРУКТУР

Андросик Андрей Борисович

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

Воробьев Сергей Андреевич

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

Мировицкая Светлана Дмитриевна

к.т.н., доцент, Государственный открытый Университет, г. Москва

E-mail: vorsa_57@mail.ru

Исходная точка развития вычислительной фотоники — анализ геометрии или топологии структуры интегрально-оптических элементов, т.е. определение характеристик пассивных и активных структур, включенных в схему. Анализ топологии структуры связан с нахождением функции оптического поля, удовлетворяющей уравнениям Максвелла или производным от них. Требуется удовлетворить граничные и начальные условия, а так же учесть свойства среды и условия возбуждения поля в волноводной структуре.

Численные методы (рис.1) преобразуют непрерывные интегральные или дифференциальные уравнения Максвелла в дискретную форму. Цель всех численных методов состоит в нахождении приближительных решений уравнений Максвелла (или уравнений, полученных из них), которые удовлетворяют заданным граничным и начальным условиям.



Рисунок 1. Численные методы

Различия между численными методами заключаются, по существу, в следующих аспектах: величине аппроксимируемого электромагнитного поля; функции разложения, которая используется для аппроксимации неизвестного решения; способе дискретизации независимых переменных; стратегии, используемой для определения коэффициентов функции разложения [1, с.81].

Все многообразие численных методов можно разделить на две большие группы, базирующиеся на решении интегральных уравнений Максвелла (рис.2) и дифференциальных уравнений Максвелла (рис.3).

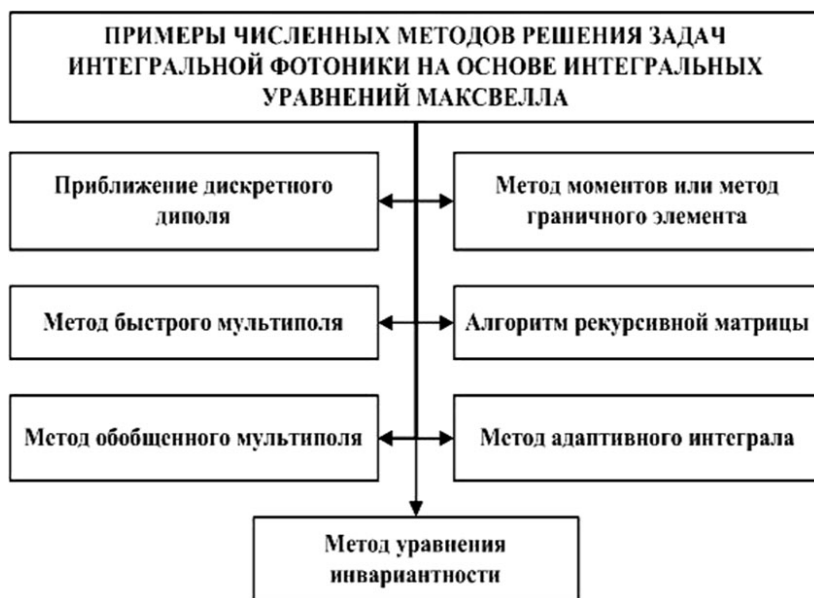


Рисунок 2. Численные методы решения задач интегральной фотоники на основе интегральных уравнений Максвелла

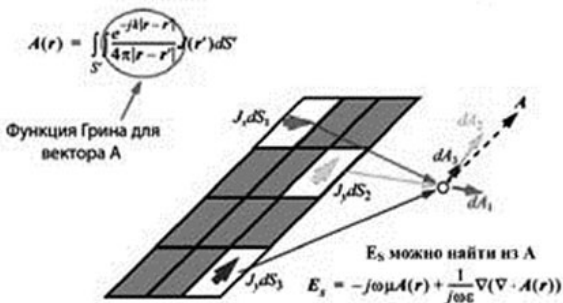
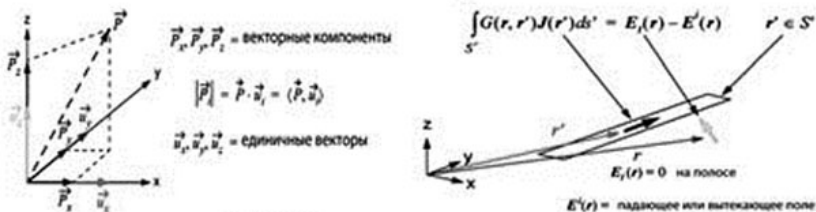


Рисунок 3. Численные методы решения задач интегральной фотоники на основе дифференциальных уравнений Максвелла

Метод моментов или метод граничного элемента. Базовый метод моментов оперирует импульсными функциями расширения и тестовыми функциями Дирака. Этот подход был модифицирован с целью непосредственного получения интегральных уравнений электрического (EFIE) и магнитного (MFIE) полей (рис.4).

Величины E и H являются функциями поля, а J — функция источника (текущая интенсивность). Инверсные операторы, таким образом, включают функции Грина, зависящие от граничных условий и распределения показателя преломления материала. В большинстве случаев эти интегральные уравнения формулируются в частотной области, хотя существуют применения также и для временной области. Вместо электрического E и магнитного H полей можно найти скалярные или векторные потенциалы.

Базисные вектора



EFIE: $L_c^{-1} J = E$

MFIE: $L_m^{-1} J = H$

Результирующее электрическое поле

$$E_s(r) = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon} \iint_{S'} (k^2 + \nabla\nabla) \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} J(r') dS'$$

Рисунок 4. Метод моментов

Приближение дискретного диполя. Метод позволяет вычислять рассеяние и поглощение электромагнитных волн объектами произвольной геометрии и состава (рис.5). Исследуемый объект описывается областью поляризованных точек (диполей). Наилучшие результаты достигаются в случае, если размеры объекта сравнимы с длиной волны (область Ми). Материалы должны иметь $|n-1| < 1$, $t_0 > 3$, n — комплексный показатель преломления. Идея метода заключается в разбиении малых объектов на малые объемы, каждый из которых несет момент диполя. Моменты диполя локального электрического поля рассматриваются отдельно для каждого диполя. Общее поперечное сечение вычисляется, используя приближение мультиполя для анизотропных и поглощающих рассеивателей. Поляризация малых объемов связана с диэлектрической функцией аппроксимацией Клаузиуса-Мозотти.

Схема применения приближения диполей для сферы (двумерная задача), белые – свободные диполи

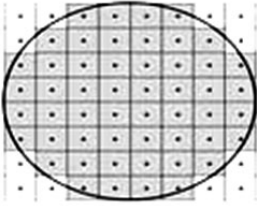
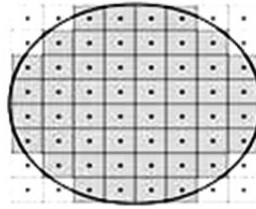
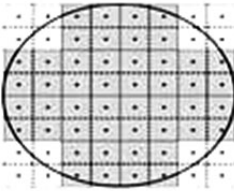


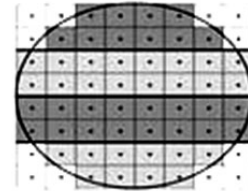
Схема после проведения дипольной корректировки



Использование «зубчатой» схемы



Формирование с помощью «четырех процессов»



Локальное электрическое поле диполя

$$E_{loc}(r_j) = E_{inc,j} + E_{dipole,j} \quad \text{где } A_n \cdot P_n = \frac{\exp(ikr_{jn})}{r_{jn}} \cdot \left\{ k^2 r_{jn} \times (r_{jn} \times P_n) + \frac{(1 - ikr_{jn})}{r_{jn}} [r_{jn}^2 P_n - 3r_{jn}(r_{jn} \cdot P_n)] \right\}$$

Результирующее значение

$$C_{ext} = \frac{4\pi k}{|E_0|^2} \sum_{i=1}^N \text{Im} (E_{inc,i}^* \cdot P_i)$$

Рисунок 5. Приближение дискретного диполя

Метод конечных разностей. Метод конечной разности (рис.6) является наиболее часто используемым численным методом. Он осуществляет дискретизацию поперечного сечения анализируемой структуры; метод подходит для моделирования диэлектрических волноводов с произвольным поперечным сечением, которые могут быть изготовлены из изотропных однородных, неоднородных, анизотропных или материалов с потерями.

в точке пересечения ячеек (каждый узел связан с максимумом четырех различных показателей преломления). Дифференциальный вектор, частично поляризованное или скалярное волновое уравнение можно при этом аппроксимировать, используя стандартную пятиточечную форму конечной разности (в членах поля в узлах сетки). Для усовершенствования метода используются более точные дифференциальные формы.

В общем случае метод конечных разностей является удобной техникой вычислений, однако численное моделирование открытых границ (свойственное диэлектрическим волноводам), требует особого внимания. Решение проблемы может быть найдено путем:

- помещения структуры в достаточно большую прямоугольную ячейку, которая не нарушает распространение поля и для которой можно использовать нулевые условия поля;
- применения открытых или согласованных граничных условий на краях ячейки, например, полагая экспоненциальное затухание поля в прямом направлении вне области (при этом возможно ослабить условия, налагаемые на размеры ячейки).

Однако, при работе в области отсечки, размеры ячейки должны быть велики для попадания электромагнитного поля в подложку. Использование однородного разбиения приводит к большому числу узлов и увеличению матрицы. Для удобства использования КР метода при моделировании больших объектов со сложной геометрией, требуется использование неоднородной сетки; при этом меньшие ячейки используются в областях, где поле подвергается резкому изменению, а более крупные ячейки могут быть применены в зонах плавного изменения поля. Несмотря на то, что ошибка дифференцирования возрастает при переходе от второго порядка к первому и матрица становится более сложной, в целом достигается достаточно точный результат, особенно в случае присутствия неоднородностей поля.

Таким образом, точность метода зависит от размера ячейки, предполагаемой природы электромагнитного поля (скалярной, поляризованной или векторной) и порядка используемой схемы конечной разности. Симметрия (или асимметрия) структуры может также привести к изменению размера ячейки с учетом соответствующих граничных условий.

Популярность КР метода при моделировании диэлектрических волноводов вызвана простотой и обобщенностью данной методики. Кроме того, алгоритм метода КР-МРЛ, моделирующего распространение излучения в волноводе, использует аналогичную КР

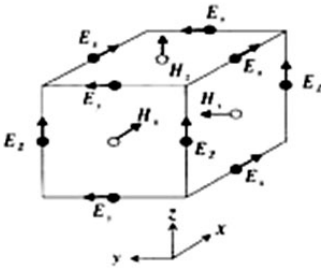
дискретизацию; таким образом, весь процесс анализа устройства и моделирования распространения поля становится более полным и законченным. Недостатки метода появляются при работе с большими областями, а также вблизи зоны отсечки; при этом следует использовать адекватные размеры ячеек, а также уделять особое внимание моделированию открытых границ. Все это приводит к значительному увеличению времени расчета и занимаемой памяти.

Метод конечных разностей во временной области — один из наиболее широко используемых числовых методов техники (рис.7). Это универсальный, методологически простой и наглядный метод. Волна, распространяющаяся через волноводную структуру, определяется путем прямого интегрирования во временной области (уравнение Максвелла) в дискретной форме. Главный недостаток метода конечных разностей во временной области — большое время вычислений.

Метод конечного элемента. Метод конечного элемента является также достаточно разработанной техникой нахождения граничных значений (рис. 8). Метод заключается в разделении исследуемой области на неперекрывающиеся зоны, обычно треугольные. Поле каждого элемента выражается в членах интерполяционных полиномов низкого порядка, взвешенных с значением функции поля в узлах каждого элемента. Общее поле определяется путем линейного суммирования полей каждого элемента. В методе конечного элемента используются вариационные выражения, полученные из уравнений Максвелла. Решение задачи можно выразить в членах натуральной частоты или в членах постоянной распространения β , в зависимости от различных формулировок. Последний случай менее предпочтителен, поскольку требуется начальное приближение для β , что затруднительно для комплексного значения величины β .

Точность метода конечного элемента можно повысить путем использования усовершенствованного разбиения на ячейки или применением полиномов более высокого порядка. Улучшенное разбиение повышает размер матриц, а применение полиномов более высокого порядка сокращает оперативность и приводит к дополнительным программным усилиям.

Ячейка Ли



Волновая функция

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{x}, t) &= \exp(j \beta_x \cdot \mathbf{x}) \cdot \exp(\alpha \cdot t) = \\ &= \exp(j \beta_x \cdot \mathbf{p} \cdot \Delta \mathbf{x}) \cdot \exp(\alpha \cdot \mathbf{n} \cdot \Delta t) = \\ &= \exp(j \beta_x \cdot \mathbf{p} \cdot \Delta \mathbf{x}) \cdot \xi^n \\ \xi &= \exp(\alpha \cdot \Delta t) \end{aligned}$$

Конечно-разностное выражение во временной области для электрического поля

$$\begin{aligned} E_x^{n+1} \left(N_x, j + \frac{1}{2}, k \right) &= E_x^n \left(N_x - 1, j + \frac{1}{2}, k \right) + \\ &+ \frac{v_x \cdot \Delta t - \Delta x}{v_x \cdot \Delta t + \Delta x} \left[E_x^{n+1} \left(N_x - 1, j + \frac{1}{2}, k \right) - E_x^n \left(N_x, j + \frac{1}{2}, k \right) \right] \\ \\ E_x^{n+1} \left(N_x, j, k + \frac{1}{2} \right) &= E_x^n \left(N_x - 1, j, k + \frac{1}{2} \right) + \\ &+ \frac{v_x \cdot \Delta t - \Delta x}{v_x \cdot \Delta t + \Delta x} \left[E_x^{n+1} \left(N_x - 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_x^n \left(N_x, j, k + \frac{1}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

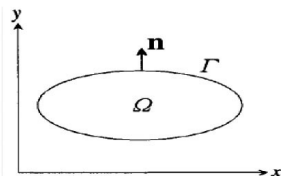
Рисунок 7. Метод конечных разностей во временной области

Появление ложных решений, вызванных не выполнением условия дивергенции ($H=0$), является серьезной погрешностью метода. Избежать ложных решений можно путем формулирования вариационных выражений в членах различных компонент поля. Существуют различные формулировки, среди которых наиболее широко используется формулировка H — поля для моделирования оптических волноводов в связи с наиболее легким выражением граничных условий. Однако такой подход не исключает возможности появления ложных решений. Формулировка в членах поперечных компонент электрического E и магнитного H полей не приводит к образованию ложных решений, однако она приводит к загроможденности матрицы. Устранение ложных решений также можно обеспечить путем введения в вариационное выражение компенсирующего члена. Величина такого члена определяется эвристически или путем проверки условия нулевой дивергенции для каждой полученной моды и исключением мод, не удовлетворяющих этому условию.



Вариационный метод

Анализируемая область



Исходное волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{эф}}^2) \cdot \phi = 0$$

Условие стационарности функционала

$$\delta \phi \cdot \iint_{\Omega} \left\{ \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{эф}}^2) \cdot \phi \right\} \cdot dx \cdot dy = 0$$

Функционал I_e элемента e , окруженный границей Γ_e

$$I = \frac{1}{2} \cdot \left[\iint_e \left\{ \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial y} \right)^2 - k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{эф}}^2) \cdot \phi_e^2 dx dy \right\} \right] - \left[\int_{\Gamma_e} \phi_e \cdot \frac{\partial \phi_e}{\partial n} \cdot d\Gamma \right]$$

Метод взвешенного остатка (Галеркина)

погрешность разности

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{эф}}^2) \cdot \phi = R$$

Уравнение для элемента e в разделенных элементах

$$\left[\int_{\Gamma_e} \psi_e \cdot \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial n} \cdot d\Gamma \right] - \iint_e \left(\frac{\partial \psi_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} + \frac{\partial \psi_e}{\partial y} \cdot \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) \cdot dx \cdot dy + \iint_e \psi_e \cdot k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{эф}}^2) \cdot \bar{\phi} \cdot dx \cdot dy = 0$$

Рисунок 8. Метод конечного элемента

Описанные выше методики являются только частично успешными, поскольку ложные решения могут возникнуть во всем частотном спектре и отделить их от физически существующих мод практически невозможно. Наиболее удобно использовать методику граничного элемента, который гасит ложные решения непосредственно на нулевой частоте. В этом подходе, интерполяционные функции определяются как вектора, и удовлетворяется непрерывность тангенциальных компонент вдоль элементов. Непрерывность нормальных компонент поля не удовлетворяется, что приводит к ненулевой дивергенции. Однако, все ложные решения сводятся к нулевой частоте и, поэтому, легко идентифицируемы.

Моделирование проблемы открытого пространства в методе конечного элемента было первоначально выполнено путем усечения вычислительного окна и помещения искусственной электрической стенки вокруг него, что неприемлемо для волноводов, работающих вблизи отсечки. Лучшие результаты можно достичь путем введения бесконечных элементов, в которых поле вынуждено экспоненциально убывать (уровень ослабления определяется эвристически). Бесконечные элементы не увеличивают размер матриц, однако они работают только с неизлучающими структурами. Лучшее приближение дают импедансные граничные условия, где соответствующие условия излучения поля на фиктивной границе (граница, разделяющая проводящую область и область затухания) приближенно удовлетворяются, и откуда получаются бесконечные условия. Это приближение можно также использовать для мод излучения путем введения комплексных значений постоянных распространения.

При моделировании задач комплексной геометрии поперечного сечения, метод конечных элементов более удобен, чем метод конечных разностей в связи с большей гибкостью треугольных элементов. Моделирование кривых границ можно дополнительно упростить путем использования изопараметрических элементов, что приводит к искривлению элементов. Однако, в случае простой геометрии поперечного сечения исследуемого образца метод КР удобнее, чем метод КЭ.

Метод распространения луча — один из наиболее широко используемых численных методов исследования волноводов (рис.9). В отличие от выше рассмотренных методов, метод распространения луча описывает преобразование общего поля, распространяющегося вдоль волновода. Базовый метод распространения луча представляет общее поле как суперпозицию плоских волн, распространяющихся в однородной среде. Распространение моделируется с использованием параксиального волнового уравнения, которое предполагает, что волновой вектор отклонен на небольшой угол относительно оси распространения. Поле, распространяющееся в неоднородной среде, вычисляется путем интегрирования полей в спектральной области и введения фазовой коррекции в пространственную область на каждом шаге распространения.

Для связи пространственной и спектральной областей было использовано быстрое преобразование Фурье (БПФ); такой метод получил название БПФ-МРЛ. Впоследствии метод БПФ-МРЛ был развит на случай слабо направляющих структур без учета векторных свойств поля. Использование параксиального приближения

ограничивает метод структурами, в которых луч распространяется только в направлениях, составляющих малые углы с осью распространения.

Чтобы избежать использования БПФ, параксиальное волновое уравнение было решено путем применения соответствующего вариационного выражения, использующего метод КЭ, а позже — с использованием метода КР, откуда и был получен метод конечной разности-распространения луча (КР-МРЛ). Сравнение методов БПФ — и КР-МРЛ показывает приемлемую точность при большем шаге в случае КР. Также время расчета шага распространения в методе КР-МРЛ значительно меньше, что делает метод более привлекательным при исследовании комплексных структур.

Использование аппарата конечной разности в методе распространения луча позволяет анализировать векторные свойства в случае двумерного и трехмерного распространения. В последнее время были разработаны схемы, базирующиеся на структурах, связанных с координатной сеткой при значительном увеличении угла между волноводом и направлением распространения.

Для моделирования условия открытой границы на конце области исследования, были применены **поглощающие граничные условия** (АВС). Впоследствии они были заменены более эффективными **условиями прозрачной границы** (ТВС). Для поглощающих граничных условий нежелательные отражения поглощаются материалом с потерями, расположенным на границе вычислительного окна. Наибольшим недостатком этой методики является то, что материал с поглощением вызывает определенные проблемы, поля на границе должны иметь нулевое значение; все это приводит к увеличению времени расчета и компьютерной памяти. В приближении прозрачной границы направление волны должно иметь определенный угол падения. Последний метод имеет меньше проблем в процессе реализации, более простой и не требует больших ресурсов памяти. Однако, размер окна должен все еще быть достаточно большим, чтобы не вызывать ослабления мощности части поля, которое распространяется в зоне сердцевины. Кроме того, эффективность методики прозрачной границы ограничена для структур с широким углом распространяющихся волн.

МЕТОДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛУЧА

Быстро преобразования Фурье БПФ-МРЛ

Скалярное уравнение Гельмгольца

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) + k_0^2 \cdot n^2(x, y, z) \cdot \psi(x, y, z) = 0 \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

волновая функция в плоскости $z+z/2$

$$\phi(x, y, z) = \sum_{m=-M/2}^{M/2-1} \cdot \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \bar{\phi}_{mn}(z) \times \exp \left\{ j \cdot \frac{2 \cdot \pi^2}{4 \cdot \beta} \cdot \left[\left(\frac{m}{X} \right)^2 + \left(\frac{n}{Y} \right)^2 \right] \cdot \Delta z \right\} \times \exp \left[j \cdot 2 \cdot \pi \left(\frac{m \cdot x}{X} + \frac{n \cdot y}{Y} \right) \right]$$

спектральная волновая функция

$$\bar{\phi}_{mn} \left(z + \frac{\Delta z}{2} \right) = \bar{\phi}_{mn}(z) \cdot \exp \left\{ j \cdot \frac{(2 \cdot \pi)^2}{4 \cdot \beta} \left[\left(\frac{m}{X} \right)^2 + \left(\frac{n}{Y} \right)^2 \right] \cdot \Delta z \right\}$$

$$\exp \left(-j \frac{\Delta z}{4\beta} \nabla_{\perp}^2 \right) \leftrightarrow \exp \left(-j \frac{\Delta z}{2} \frac{\nabla_{\perp}^2}{(\beta^2 + \nabla_{\perp}^2)^{1/2} + \beta} \right)$$

**Приближение
Френеля**

**Широкоугольная
формулировка**

Конечных разностей КР-МРЛ

**Волновое уравнение электрического
поля**

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k_0^2 \cdot \epsilon_r \cdot E_y = 0$$

**Волновое уравнение для главной составляющей
 H_x магнитного поля**

$$k_0^2 \cdot (\epsilon_r - n_{\text{eff}}^2) \cdot \phi = k_0^2 \cdot \left[\epsilon_r(p) - n_{\text{eff}}^2 \right] \cdot \phi_p$$

Центр дифференцирования p

Волновое уравнение Френеля

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x} \cdot \left(\underbrace{\frac{\phi_{p+1} - \phi_p}{\Delta x}}_{\text{Центр дифференцирования } p + \frac{1}{2}} - \underbrace{\frac{\phi_p - \phi_{p-1}}{\Delta x}}_{\text{Центр дифференцирования } p - \frac{1}{2}} \right) =$$

$$= \frac{\phi_{p+1} - 2 \cdot \phi_p + \phi_{p-1}}{(\Delta x)^2}$$

Центр дифференцирования p

$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + k_0^2 \cdot \epsilon_r \cdot H_x = 0$$

Рисунок 9. Метод распространения луча

Поэтому было разработано новое граничное условие — **идеально согласованный слой** (PML), которое является наиболее эффективным. Методика идеально согласованного слоя базируется на введении фиктивного слоя с определенной электрической проводимостью, который может абсорбировать и экспоненциально ослаблять проходящую волну при любом угле или частоте. КР-МРЛ является одним из наиболее популярных методов анализа распространения поля в неоднородных оптических волноводах, таких как конусы, Y-разветвители, изгибы и решетки.

Список литературы:

1. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Волноводная и интегральная фотоника. — М.: МГОУ, 2011. 370 с.
2. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Основы волноводной фотоники. — М.: МГОУ, 2009. 246 с.
3. Андросик А.Б., Воробьев С.А., Мировицкая С.Д. Математические основы волноводной фотоники. — М.: МГОУ, 2010. 224 с.

МНОГОМЕРНЫЕ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД СЛУЧАЙНОШЕРОХОВАТОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Захаров Фёдор Николаевич

аспирант, ТУСУР, г. Томск,

E-mail: zfn_kom@mail.ru

Поверхности реальных тел всегда в той или иной степени неровны, в силу чего отражение и преломление волн на этих поверхностях сопровождаются явлениями, которые отсутствуют в случае идеально гладких границ раздела. Степень «гладкости» определяется в первую очередь соотношением между длиной волны и геометрическими параметрами неровностей.

Характер рассеяния определяется многими факторами. Кроме размеров неровностей и длины волны падающего излучения, играют роль размеры рассеивающей площади, способ её облучения, а также поляризация первичной волны, отражающие и преломляющие свойства вещества и т. д. В зависимости от соотношения между различными параметрами применяют те или иные приближённые методы расчёта рассеянного поля [4]. Два наиболее простых и часто применяемых метода — это метод малых возмущений и метод Кирхгофа. Метод малых возмущений пригоден для описания поверхностей с малыми неровностями, причём наклоны поверхности должны быть меньше единицы. Приближение Кирхгофа применимо для поверхности с радиусами кривизны, значительно превышающими длину волны [3].

В литературе достаточно подробно описано рассеяние волн на объёмных неоднородностях и на неровной поверхности и получено много данных о корреляционных характеристиках поля при единственном источнике излучения электромагнитных волн и разнесении точек наблюдения. Работ, в которых рассматривается совместное разнесение источников и приёмников, очень мало. В частности, в статье [5] рассматривается отражение волн от случайно-неровной поверхности при малых углах падения для случая горизонтального разнесения точек излучения и точек наблюдения, а в работе [1] — для случая произвольных разнесений точек излучения и точек наблюдения, но при рассеянии волн на объёмных неоднородностях. В связи с этим целью данной работы является

создание математической модели многомерной функции когерентности рассеянного поля для случая совместного пространственного разнесения источников и приемников по горизонтали поперёк трассы распространения радиоволн (РРВ). Функция когерентности и функция рассеяния связаны между собой парой преобразований Фурье.

При выводе функции будем рассматривать только случай, характерный для приземных трасс, когда источники и приёмники располагаются на небольшой высоте над поверхностью земли, т.е. волна распространяется под малыми углами к подстилающей поверхности.

Расположим оси декартовой системы координат (x, y, z) так, чтобы ось Ox была направлена вдоль трассы по поверхности земли, а ось Oz — вертикально. Пусть высота в среднем плоской земной поверхности описывается статистически однородной изотропной нормальной случайной функцией $h(x, y)$, среднее значение и дисперсия которой равны нулю и σ_h^2 соответственно, а ковариационная функция имеет гауссовскую форму

$$\begin{aligned} R_h(x_1, x_2, y_1, y_2) &= R_h((x_2 - x_1), (y_2 - y_1)) = \\ &= \sigma_h(x)^2 \exp\left(-\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2 l(x)^2}\right) \approx \\ &\approx \sigma_h(x)^2 \left(1 - \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{2 l(x)^2}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x = (x_1 + x_2)/2$, $\Delta x = (x_1 - x_2)$, $\Delta y = (y_1 - y_2)$,

$l(x)$ — среднеквадратическая ширина ковариационной функции (радиус корреляции).

Поскольку область, существенная для РРВ микроволнового диапазона, обычно бывает достаточно узкой в направлении поперек трассы, мы не учитываем зависимости σ_h и R_h от четвертой переменной $y = (y_1 + y_2)/2$.

Два ненаправленных источника расположены на одной высоте и разнесены поперек трассы, то есть имеют декартовы координаты $(x_{и1}, y_{и1}, D_{и1})$ и $(x_{и2}, y_{и2}, D_{и2})$, а такие же две точки наблюдения характеризуются координатами $(x_{п1}, y_{п1}, D_{п1})$ и $(x_{п2}, y_{п2}, D_{п2})$. Будем рассматривать две независимые пары источников и приёмников: Источник 1 — Приёмник 1, Источник 2 — Приёмник 2.

В микроволновом диапазоне горизонтальные размеры неоднородностей земной поверхности существенно больше длины

волны, поэтому для решения данной задачи воспользуемся методом Кирхгофа: с точностью до постоянной напряжённость электромагнитного поля в точке наблюдения определяется суммой волн, отражённых от каждой точки земной поверхности [4]

$$\begin{aligned}
 E(x_n, x_n, y_n, y_n, D_n, D_n) &= \\
 &= \text{const} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{(x - x_n)(x - x_n)} \cdot \frac{\cos \gamma(x) + \cos \theta(x)}{2} \times \\
 &\times \exp \left\{ ik \left[\sqrt{(D_n - h(x, y))^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \right. \right. \\
 &\left. \left. + \sqrt{(D_n - h(x, y))^2 + (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2} \right] \right\} dx dy
 \end{aligned} \tag{2}$$

где D_u — высота расположения источников;

D_n — высота расположения приёмников;

$k = 2\pi / \lambda$ — волновое число,

$\gamma(x)$ и $\theta(x)$ — угол падения луча из источника в точку (x, y) на поверхности земли и такой же угол «отражения» луча, попадающего в точку наблюдения.

Хорошо видно, что затенения отдельных участков отражающей поверхности в этой формуле не учитываются, в противном случае методика анализа существенно усложняется из-за необходимости учитывать дифракционные эффекты и многократное рассеяние. Это предположение с большой вероятностью можно считать справедливым, если выполняется условие

$$\frac{D_n + D_n}{r} > (2 \dots 3) \cdot S, \tag{3}$$

где $r = x_n - x_u$ — длина трассы РРВ;

$S = \sigma_n / l$ — параметр, характеризующий типичное значение углов наклона неровностей отражающей поверхности.

В (2) множитель перед экспонентой учитывает дистанционное ослабление сигнала на трассе РРВ. Слагаемые в показателе экспоненты определяют длину пути распространения сигнала при его отражении от точки неровной поверхности с координатами (x, y) .

Математическое ожидание выражения (2) определяет комплексную амплитуду зеркально отражённого луча в каждой из точек наблюдения. Полагая, что высоты расположения источников (D_u) и приёмников (D_n) и область интегрирования поперёк трассы (y)

малы по сравнению с длиной трассы РРВ, разлагаем раздельно в ряды по степеням малых параметров выражения, стоящие в показателе экспоненты и перед ней в (2), сохраняя минимально необходимое число членов разложения. Далее воспользуемся [4] известным соотношением $M[\exp(iz)] = \exp[-M(z^2)/2]$, где M — оператор вычисления математического ожидания. И, наконец, интегрируем по переменной y , при этом используем табличный интеграл [2] для экспоненты с квадратичным показателем. В итоге получаем

$$A_{\text{зеп}} = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{i\lambda QP}{Q+P}} \cdot \frac{4}{4x^2 - r^2} \exp \left[-\frac{k^2 \sigma_h^2}{2} \left(\frac{1}{P} + \frac{1}{Q} \right)^2 (D_{\text{и}} + D_{\text{п}})^2 + ik(Q+P) \right] dx; \quad (4)$$

$$\text{где } P = \sqrt{x^2 - rx + r^2/4 + D_{\text{п}}^2}; \quad Q = \sqrt{x^2 + rx + r^2/4 + D_{\text{и}}^2}$$

Функцию когерентности определим как математическое ожидание от произведения напряжённостей поля в наблюдаемых точках:

$$R(x_{\text{и}}, y_{\text{и}1}, y_{\text{п}1}, x_{\text{п}}, y_{\text{и}2}, y_{\text{п}2}) = M[E(x_{\text{и}}, x_{\text{п}}, y_{\text{и}1}, y_{\text{п}1}) \cdot E^*(x_{\text{и}}, x_{\text{п}}, y_{\text{и}2}, y_{\text{п}2})], \quad (5)$$

где звёздочка — знак комплексного сопряжения.

В результате расчётов с учётом тех же допущений и предположения, что величины разнесения источников $\Delta y_{\text{и}} = y_{\text{и}2} - y_{\text{и}1}$ и приёмников $\Delta y_{\text{п}} = y_{\text{п}2} - y_{\text{п}1}$ малы по сравнению с длиной трассы, получаем следующее выражение для функции когерентности

$$R(\Delta y_{\text{и}}, \Delta y_{\text{п}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{l\lambda^2 Q^2 P^2}{\sqrt{\pi/2} \sigma_h (D_{\text{и}}P + D_{\text{п}}Q)(Q+P)(x+r/2)^2(x-r/2)^2} \times \exp \left[-\frac{l^2}{\sigma_h^2} \cdot \frac{4x^2(Q+P)^2 + 4xr(P^2 - Q^2) + r^2(Q-P)^2}{8(D_{\text{и}}P + D_{\text{п}}Q)^2} - \frac{k^2 \sigma_h^2}{2l^2} \cdot \frac{(\Delta y_{\text{и}}P + \Delta y_{\text{п}}Q)^2 (D_{\text{и}}P + D_{\text{п}}Q)^2}{Q^2 P^2 (Q+P)^2} + ik(Q+P) \right] dx. \quad (6)$$

На рисунке 1 для примера представлено семейство равных уровней функции когерентности в координатах $(\Delta y_u, \Delta y_n)$, а её сечение при фиксированном значении разнесения источников — на рисунке 2. Графики получены при следующих значениях параметров: $\lambda = 3$ см, $D_u = D_n = 7$ м, $r = 1$ км, $\sigma_h = 0,03$ м, $l = 1$ м.

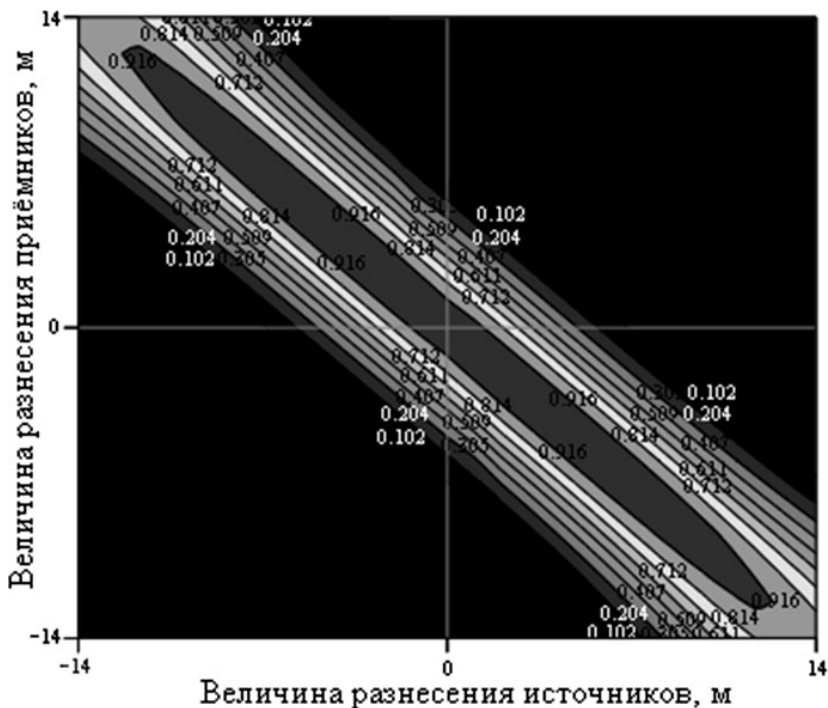


Рисунок 1. Эллипс равных сечений функции когерентности

Абсолютный максимум функции достигается при нулевых значениях разнесений источников и приёмников. Локальный максимум при фиксированном значении одного из разнесений достигается при равном по модулю и противоположном по знаку значении второго разнесения.

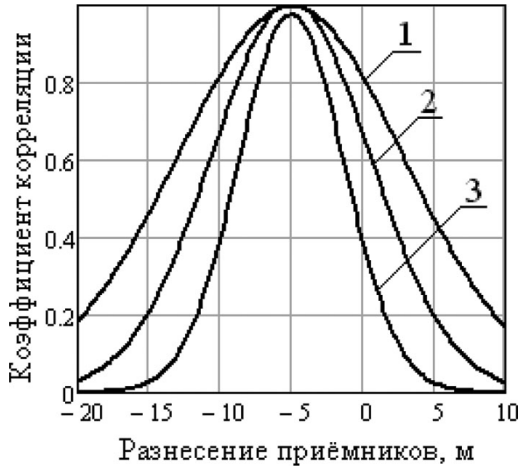


Рисунок 2. Сечение функции когерентности плоскостью $\Delta u_n = 5$ м для трёх значений высот источников и приёмников:
1 — $D_u = D_n = 7$ м; 2 — $D_u = D_n = 10$ м; 3 — $D_u = D_n = 15$ м.

При анализе эллипса равных сечений (рисунок 1) удобно использовать коэффициент эллиптичности сечения равных уровней когерентности

$$\xi = \frac{a}{b}, \quad (7)$$

где a и b — значения главных осей эллипса.

Из определения следует, что $0 \leq \xi \leq 1$. В [1] показано, что при РРВ в случайно-неоднородной среде оба предельных значения параметра ξ (0 и 1) соответствуют двум вырожденным случаям: $\xi = 0$ означает, что все случайные неоднородности среды сосредоточены в бесконечно тонком плоском случайном экране, размещенном посреди трассы; при $\xi = 1$ предполагается, что все неоднородности сконцентрированы в двух одинаковых (в среднем) плоских случайных экранах, прилегающих к апертурам передающих и приемных антенн. Если же неоднородности равномерно распределены вдоль трассы, то $\xi = 1/\sqrt{3} \approx 0,57$. Анализ выражения (6) показывает, что подобные свойства параметра ξ характеризовать относительный продольный размер области, существенной для рассеяния волн, присутствуют и в случае рассеяния волн на неровной поверхности, свойства которой меняются вдоль трассы.

Проведённый анализ показал, что коэффициент эллиптичности ζ имеет степенную зависимость от параметра S . Это позволяет по измеренной корреляции отражённых сигналов определить статистические параметры неровностей отражающей поверхности.

На рисунке 3 представлена зависимость формы функции когерентности от параметра S , который характеризует соотношение поперечных и продольных размеров неровностей отражающей поверхности.

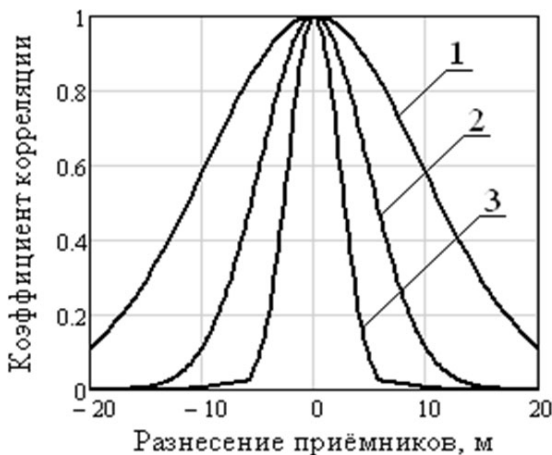


Рисунок 3. Зависимости формы функции когерентности на расходящихся трассах от параметра неровной поверхности S

1 — $S = 0,01$; 2 — $S = 0,02$; 3 — $S = 0,04$.

Из рисунка 3 видно, что с увеличением S ширина функции уменьшается и стремится к постоянному значению. Маленькой величине S соответствуют либо маленькие высоты неровностей, либо большие горизонтальные размеры элементов рельефа отражающей поверхности. В этом случае поверхность становится ровной с плавным изменением уровня, т.е. отражение практически зеркальное.

Статистические характеристики подстилающей поверхности (СКО высоты неровностей и интервал пространственной корреляции) определяются по электронным картам местности при стандартной обработке двумерного профиля.

Полученные результаты позволяют численно определить следующие параметры для заданных значений высот источников и приёмников и их разнесений с учётом знака:

1) плотность потока мощности в свободном пространстве для ненаправленного источника единичной мощности

$$P_0 = \frac{1}{4\pi L^2}, \quad (8)$$

где $L = \sqrt{(D_n - D_n)^2 + (x_n - x_n)^2 + (y_n - y_n)^2}$ — длина пути распространения луча;

2) ожидаемую комплексную амплитуду напряжённости поля

$$A_0 = \sqrt{P_0} \exp(ikL); \quad (9)$$

3) комплексную амплитуду зеркально отражённого луча, численно вычислив значение интеграла (4). Шаг интегрирования по x должен равняться $(0,2 \dots 0,3) \cdot l$, но не более $0,01r$.

4) суммарную амплитуду регулярного сигнала

$$A_{\text{рег}} = A_0 + A_{\text{зер}}; \quad (10)$$

5) множитель ослабления для рассеянной составляющей поля в точках приёма

$$V = \frac{R(0,0)}{P_0}; \quad (11)$$

6) по формуле (6) значение коэффициента корреляции сигналов в точках приёма.

Чтобы построить пространственную функцию когерентности, необходимо провести расчёты по пункту б) для различных значений разнесений источников и приёмников.

Проведённый анализ показал, что функция когерентности достигает максимума при противоположных по знаку и равных по модулю значениях разнесения источников и приёмников. Если использовать терминологию, применяемую в [1], то это так называемые «пересекающиеся» трассы, корреляция сигналов на которых максимальна. На «параллельных» трассах (разносы равны по модулю и по знаку) корреляция низкая и зависит от абсолютных значений разносов. Промежуточным является случай «расходящихся» или «сходящихся» трасс, когда один из разносов намного больше другого.

Зависимость функции когерентности от параметров неровной отражающей поверхности в общем случае определяется параметром S ,

который характеризует вертикальные и горизонтальные размеры неоднородностей. С увеличением этого параметра интервал корреляции уменьшается.

Полученные модели могут использоваться для оценки статистических характеристик полей и радиосигналов на выходах антенн в радиотехнических системах различного назначения, работающих на приземных трассах. В частности, в системах диагностики и прогнозирования условий распространения УКВ в тропосфере.

Список литературы:

1. Акулиничев Ю.П., Голиков А.М. Анализ корреляционных характеристик случайно-неоднородных каналов при комплексном разнесении источников и приемников // Радиотехника и электроника. — 1987. — Т.32, вып.8. — С. 1646 — 1654.
2. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. — 1108 с.
3. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 2. М.: Мир, 1981. — 280 с., ил.
4. Рытов С.М., Кравцов Ю.А. Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. — 464 с., ил.
5. Chan T. K., Y. Kuga, A. Ishimaru. Angular memory effect of millimeter-wave scattering from two-dimensional conducting random rough surfaces // Radio Science. — 1995, V. 31. — P. 1067 — 1076.

СЕНСОРНАЯ КЛАВИАТУРА ДЛЯ НАБОРА ТЕКСТА ЛЮДЬМИ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ. РЕАЛИЗАЦИЯ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА MSP430G2452IN20

Степанов Андрей Борисович

*старший преподаватель СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
г. Санкт-Петербург*

E-mail: dsp.help.2011@yandex.ru

Одно из направлений современной науки и техники — создание устройств позволяющих повысить уровень жизни людей с ограниченными возможностями. Данная работа посвящена разработке сенсорной клавиатуры, позволяющей производить набор текста людям с ограничениями движения верхних конечностей: по силе и амплитуде. Ограничения по амплитуде предоставляют требования к малым размерам клавиатуры, а ограничения по силе — требуют применения бесконтактных технологий. Немаловажным требованием является доступная цена.

В качестве базы для реализации такого устройства предлагается использовать отладочные платы производства фирмы Texas Instruments: MSP430 Launch Pad (рис. 1) и 430BOOST-CAPTOUCH1 (рис. 2). На плате MSP430 Launch Pad устанавливается микроконтроллер MSP430G2452IN20. Встроенный эмулятор с mini USB портом позволяет подключить отладочную плату к компьютеру. Плата 430BOOST-CAPTOUCH1 подключается к MSP430 Launch Pad через модули расширения [1].

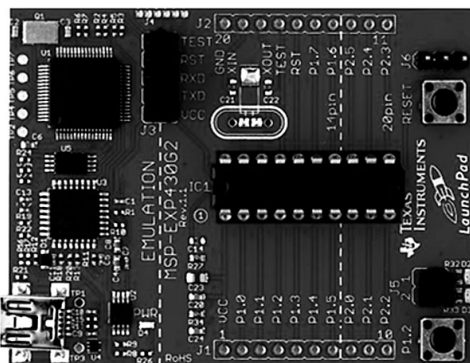


Рисунок 1. Отладочная плата MSP430 Launch Pad

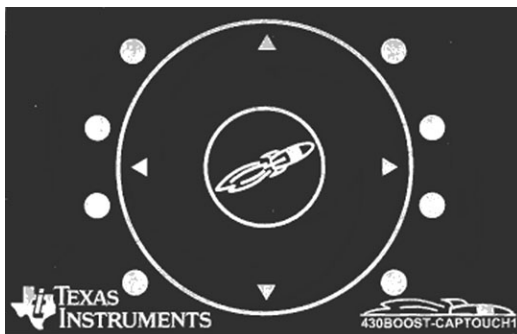


Рисунок 2. Отладочная плата 430BOOST-CAPTOUCH1

Плата 430BOOST-CAPTOUCH1 представляет собой емкостную клавиатуру со светодиодной обратной связью.

Рассмотрим основные характеристики плат и микроконтроллера.

1. Микроконтроллер MSP430G2452IN20 [2]:
 - ядро — MSP430;
 - число выводов — 20 шт.;
 - разрядность шины данных — 16 бит;
 - максимальная тактовая частота — 16 МГц;
 - емкость памяти программ — 8 Кбайт;
 - емкость ОЗУ — 256 байт.
2. MSP430 Launch Pad:
 - mini USB;
 - светодиоды;
 - кнопка RESET;
 - настраиваемая кнопка.
3. 430BOOST-CAPTOUCH1:
 - число светодиодов — 9 шт.;
 - тип сенсорных элементов — емкостные;
 - датчик приближения.

Принцип соединения основных узлов отражен на рис.3.



Рисунок 3. Соединение основных узлов

Программирование микроконтроллера — особая задача. Выполняется в среде разработки Code Composer Studio (CCS) (рис. 4).

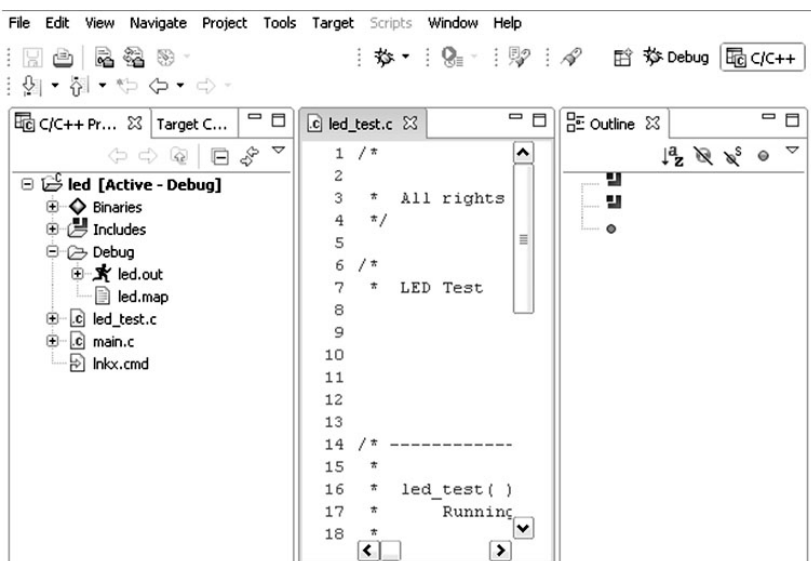


Рисунок 4. Диалоговое окно Code Composer Studio (CCS)

Среда разработки и принципы программирование на языке С предоставляют широкие возможности интеграции с другими приложениями, установленными на компьютере.

В качестве такого приложения может выступать специально разработанный текстовый редактор. Его особенностью является адаптация интерфейса к ряду ограничений:

1. ограниченное число возможных комбинаций переключателей платы;
2. отсутствие возможности однозначного представление конкретного символа одной из клавиш;
3. требование смены языка и шрифта одним переключателем (а не комбинацией нескольких клавиш).

С учетом этих требований были разработаны следующие режимы работы устройства:

1. Режим прямого набора текста — при прокрутке меню с набором букв (производится движением пальца по рабочей поверхности платы 430BOOST-CAPTOUCH1) выбирается нужная буква (рис. 5) или цифра (в зависимости от состояния переключателя).



Отладочная плата

Рисунок 5. Первый режим ввода

Режим быстрого ввода (или интеллектуальный ввод) — после ввода первых букв текстовый редактор предлагает возможные варианты слов (слова, в которых встречаются введенные буквы), пользователю остается лишь выбрать нужное слово из списка (рис. 6).

Такой принцип построения системы не позволяет получить большое быстродействие и ориентирован на коммуникационные аспекты жизни людей с ограниченными возможностями. Основным достоинством данного устройства является простота использования и доступная стоимость. По проведенным расчетам цена клавиатуры (без учета стоимости программного обеспечения) не превышает стоимости стандартной компьютерной клавиатуры.



Отладочная плата

Рисунок 6. Второй режим ввода

Статья носит исключительно научный и социальный характер, направлена на привлечение внимания общественности к проблемам людей с ограниченными возможностями и возможным путям их решения.

Список литературы:

1. Сайт компании Texas Instruments. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.ti.com>
2. Сайт компании Mouser Electronics. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: http://www.de.mouser.com/search/ProductDetail.aspx?qs=cH06ZXZlI8SHFq7c9KM3lkw%3d%3d&cm_mmc=findchips_-_na_-_na_-_na

СЕКЦИЯ 5.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

Авьяшкиева Надежда Сергеевна

*аспирант СГУ, г. Ставрополь
преподаватель КГТ-ЭК, г. Элиста*

E-mail: nadyusha84@yandex.ru

Настоящий период развития вычислительной техники характеризуется интенсивным поиском новых принципов обработки и хранения информации, построения вычислительных архитектур и систем с привлечением современных технологий, среди которых одной из наиболее востребованных является цифровая обработка сигналов (ЦОС).

Одним из основных направлений ЦОС является спектральный анализ. Мощным инструментом, используемым в методах спектрального анализа, является Фурье-анализ. Для уменьшения количества арифметических операций, требуемых для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ),

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (f(n) \cdot W_N^{nk}), \quad k = 0 \dots N-1, \quad \text{где } W_N^{nk} = \exp\left(-i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot n \cdot k\right) \quad (1)$$

разработан ряд алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Алгоритмы БПФ характеризуются внутренним параллелизмом, поэтому перспективной является их реализация с помощью системы счисления остаточных классов как системы, обладающей высоким уровнем естественного параллелизма при выполнении арифметических операций.

БПФ по основанию 2 с прореживанием по времени заключается в разбиении исходной последовательности отсчетов $f(n)$, $n = 0 \dots N-1$ на две последовательности длиной $N/2$, $f_0(n)$ и $f_1(n)$,

$n = 0 \dots N/2 - 1$, таких что: $f_0(n) = f(2 \cdot n)$ содержит чётные индексы, а $f_1(n) = f(2 \cdot n + 1)$ — нечётные, $n = 0 \dots N/2 - 1$ [3, с. 123]. С учётом этого формула (1) будет иметь вид (2):

$$\begin{aligned} F(k) &= F_0(k) + W_N^k \cdot F_1(k), \quad k = 0 \dots N/2 - 1, \\ F(k + N/2) &= F_0(k) - W_N^k \cdot F_1(k), \quad k = 0 \dots N/2 - 1, \quad \tilde{W}_N^k = \exp\left(-i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N} \cdot k\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим алгоритмы представления и обработки данных в СОК.

Полной системой вычетов по модулю p называется совокупность p -целых чисел, содержащая точно по одному представителю из каждого класса вычетов по модулю p . Каждый класс вычетов по модулю p содержит в точности одно из чисел совокупности всех возможных остатков от деления на p : $0, 1, \dots, p - 1$.

Фундаментальным положением, лежащим в основе модулярного представления чисел, является китайская теорема об остатках (3):

Теорема. Пусть p_1, p_2, \dots, p_k — попарно взаимно-простые числа, больше 1, и пусть $P = p_1 p_2 \dots p_k$. Тогда существует единственное неотрицательное решение по модулю P следующей системы сравнений:

$$x \equiv \alpha_1 \pmod{p_1}, \quad x \equiv \alpha_2 \pmod{p_2}, \quad \dots, \quad x \equiv \alpha_k \pmod{p_k}. \quad (3)$$

Пусть заданы положительные числа p_1, p_2, \dots, p_n , которые называют основаниями или модулями системы. Обозначим $P = \prod_{i=1}^n p_i$.

Эта величина характеризует объём диапазона системы [4, с. 9]. Под системой остаточных классов понимают такую непозиционную систему счисления, в которой целое неотрицательное число A можно представить в виде набора остатков от деления этого числа на выбранные основания системы, т. е. (4)

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \quad \alpha_i = A - \left[\frac{A}{p_i} \right] \cdot p_i, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (4)$$

Можно выделить ряд преимуществ обработки сигналов в СОК:

1. отсутствие межрядных связей в числе, кодированном вычетами в СОК, позволяет осуществлять независимую обработку сигналов в каналах СОК;

2. малоразрядность остатков приводит к снижению ошибок округления, уменьшению аппаратурных затрат и увеличению быстродействия;

3. ввиду небольшого количества существующих кодовых комбинаций в СОК имеется возможность построения табличной арифметики;

4. реализация принципа конвейерной обработки информации;

5. высокая точность, надежность, алгоритмическая отказоустойчивость и способность к самокоррекции [2, с. 118].

Рассмотрим алгоритм БПФ в СОК, учитывающий свойства целых чисел в коммутативном кольце вычетов, а также схемы его технической реализации.

Метод синтеза устройств БПФ в СОК основан на идее корреляции величины модуля со значением весовых коэффициентов фильтра (или поворачивающих множителей БПФ). Необходимо обеспечить совпадение NS и W (NS и A, B), или сделать их отличными на $\pm 1, \pm 2$. Этапы решения:

1. первоначальный предварительный выбор множества оснований СОК;

2. изменение выбранных оснований с целью их приближения к весовым коэффициентам (до $W=NS\pm 1$ или $A, B=N_S\pm 1$) путем введения нормирующего множителя M ;

3. подсчет аппаратурных затрат и быстродействия во всех случаях;

4. вычисление погрешностей.

Наибольшее влияние на число каналов БПФ в СОК оказывают максимальный диапазон результата ρ_{\max} , который зависит от числа отсчетов N , разрядности R данных $x(n)$ и разрядности RW весовых коэффициентов W_k :

$$\rho_{\max} = 2^{R + R_w + \log_2 N_1}, \text{ где } N_1 = N/2.$$

Величина R_w выбирается, исходя либо из точности дискретизации ε_1 , либо из заданного отношения среднеквадратичного значения (СКЗ) ошибки к СКЗ сигнала ε_2 , либо принимается, что $R_w=R$.

Для теоретического определения числа каналов и модулей СОК при реализации N -точечного БПФ в качестве основного использовалось соотношение:

$$\log_2 \rho \geq \log_2 N + R + R_w - 1.$$

Результаты программного синтеза показали, что практически максимально возможный результат не превышает 2^{18} для большинства алгоритмов.

Для осуществления вычислительной операции «бабочка» в каждом S-м канале СОК необходимо провести операции сложения и умножения по соответствующему модулю (будем рассматривать случай прореживания по времени):

$$C_S = A_S + B_S W_S^k; \quad D_S = A_S - B_S W_S^k = A_S + B_S V_S^k;$$

где $C_S = \langle C \rangle \bmod N_S$; $A_S = \langle A \rangle \bmod N_S$; $B_S = \langle B \rangle \bmod N_S$;

$$D_S = \langle D \rangle \bmod N_S; \quad W_S^k = \langle W^k \rangle \bmod N_S; \quad V_S^k = \langle N/2 - W^k \rangle \bmod N_S.$$

Для уменьшения аппаратных затрат и увеличения быстродействия предложено, во-первых, построение табличных модулей (ТМ), реализующих операцию «бабочка» в СОК с использованием соотношений: $\langle W^k \rangle = \langle N/2 - W^k \rangle$;

$\langle W^{k+N/2} \rangle = V_S^k$; $V_S^{k+N/2} = W_S^k$. Вариант одной из схем базовых ТМ, реализующих операцию «бабочка» в СОК для $R_S=3..4$, представлен на рис.1. В качестве таблиц возможно использование ППЗУ (в неперестраиваемых структурах) и сверхоперативных ЗУ, загружаемых из основной памяти таблицами выполняемых арифметических операций. Операнды подаются на шину адреса ТМ, с информационных выходов которых снимаются числа C_S и D_S . При $R_{Smax} \leq 3..4$ объем памяти ТМ составляет 256 байт, а при $R_{Smax}=5..6$ — не превышает 4 Кб, что не составляет проблем при технической реализации. Во-вторых, предлагается реализация функциональных модулей СОК на комбинационных операционных схемах (КОС), выполненных в виде заказных СБИС или синтезированных на ПЛМ (ПЛИС). На рис. 2 показана схема, в которой совмещен ряд логических операций «И» и «ИЛИ». В-третьих, предложено использовать логический подход к построению блока формирования весовых коэффициентов для его упрощения (уменьшается объем таблиц ППЗУ в вычислительном блоке определения C_S и D_S): если $\langle B W^k \rangle = r$, то $\langle B V^k \rangle = \langle -B W^k \rangle = N_S - r$. Эти соотношения реализуются в виде комбинационных схем, представленных на рис. 3. [1, с. 21].

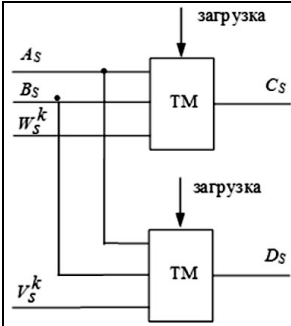


Рисунок 1. Схема базового ТМ для $R_S=3...4$

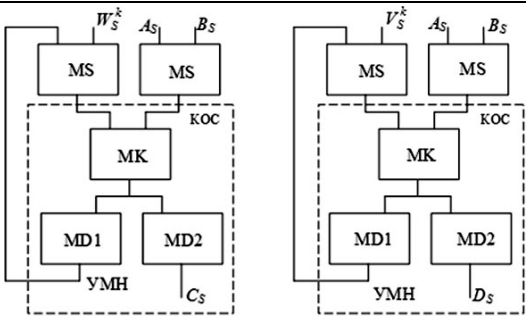


Рисунок 2. Схема СБИС на КОС для вычисления БПФ в СОК

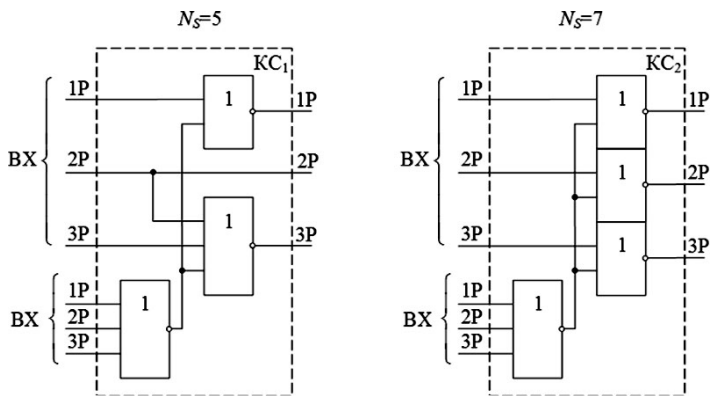


Рисунок 3. Комбинационная схема для $N_S=5, 7$

Список литературы:

1. Галанина Н. А. Методы и вычислительные устройства цифровой обработки сигналов в системе остаточных классов. Автореф. дис. докт. техн. наук. — Казань, 2010. — 35 с.
2. Лебедев Е. К. Оптимальные алгоритмы БПФ в СОК // Перспективные технологии в средствах передачи информации: сб. тезисов докл. Междунар. конф. — Владимир: Изд-во Влад. политех. ун-та, 1995.- с. 118-119.
3. Цифровая обработка сигналов: Учебн. Пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. — 2изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1990. — 256 с.: ил.
4. Червяков Н. И. и др. Нейрокомпьютеры в системе остаточных классов. Кн. 11: Учебное пособие для вузов.- М.: Радиотехника, 2003, — с. 272.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОИСКА ПУТИ В ЛАБИРИНТЕ ПРИ ПОМОЩИ UML ДИАГРАММ И СЕТЕЙ ПЕТРИ

Марков Александр Владимирович

*аспирант по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление
и обработка информации (в промышленности)», НГТУ, г.*

Новосибирск

E-mail: muviton3@mail.ru

Романников Дмитрий Олегович

*аспирант по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление
и обработка информации (в промышленности)», НГТУ, г.*

Новосибирск

E-mail: dmitry.romannikov@gmail.com

Воевода Александр Александрович

д. т. н., профессор кафедры автоматики, НГТУ, г. Новосибирск

E-mail: ucit@ucit.ru

I. Введение

Разработка программного обеспечения включает выделение свойств системы на основе анализа модели предметной области и требований к ПО.

В зависимости от класса создаваемого ПО используют «ручное» проектирование, либо пользуются различными средствами его автоматизации. Описывая характеристики ПО, применяют разнообразные нотации — блок-схемы, ER-диаграммы, UML-диаграммы, DFD-диаграммы, а также сети Петри.

Применение UML диаграмм совместно с сетями Петри [2, 4] предоставляет разработчикам возможность выявить неточности еще при постановке задачи. Анализ динамики функционирования системы можно описать через свободный язык сетей Петри [1].

Сети Петри — математический аппарат для исследования систем. Считается, что анализ сетей содержит важную информацию о структуре и динамическом поведении моделируемой системы.

Обычно системы состоят из отдельных взаимодействующих компонент. В свою очередь любая компонента может быть системой, но ее поведение можно описать независимо от других компонент системы. Исключением являются точно определенные взаимодействия с другими компонентами (совмещённость или параллелизм).

Поскольку компоненты системы взаимодействуют между собой, необходимо установление синхронизации. Обмен информацией от одной компоненты к другой требует, чтобы действия включенных в обмен компонент были во время взаимодействия синхронизированы. Это может привести к тому, что одна компонента будет ждать другую компоненту. Согласование во времени действий различных компонент может быть очень сложным, а получающиеся в результате взаимодействия между компонентами трудны в описании.

Сети Петри разрабатывались специально для моделирования систем, содержащих взаимодействующие параллельные компоненты, таким образом алгоритмы параллельного программирования и гиперпоточности можно протестировать с помощью сетей Петри.

II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

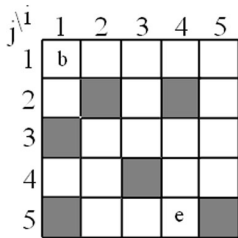


Рис. 1. Лабиринт

Разрабатываемая система представляет собой лабиринт размерностью 5x5, включающий в себя проходы, стены, клетку входа и клетку выхода. Метка будет начинать движение с клетки «начало» и заканчивать в клетке «конец».

Лабиринт (рис. 1) задан двухмерным массивом $x[i][j]$. Элементы массива будут равняться 1 или 0 (0 — проход, 1 — стена).

Реализация системы происходит с помощью UML диаграмм, основанных на алгоритмах из работ [5—8].

Вначале, проектируется диаграмма классов (рис. 2), состоящую только из одного класса «робот», который обращается к массиву лабиринт.

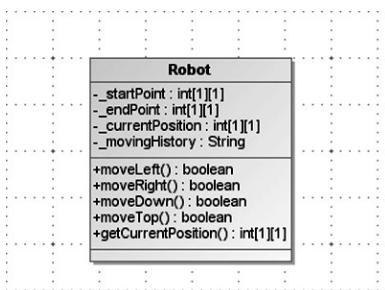


Рис. 2. Структурная диаграмма для класса «робот»

Нужно выделить, что при движение «робота» по лабиринту, в нем будет накапливаться история перемещений. Опираясь на методы разработки программного обеспечения [6—8], реализуем структурную диаграмму (рис. 3), состоящую из начального состояния (InitialState) и составного состояния — *moving*. На рисунке 4 представлено вложенные состояние, описывающее движение «робота».

Применение комментариев [9] в состояниях, позволяет указать на нюансы, которые должны быть реализованы в сети Петри. В проектируемой системе это сохранение истории передвижений в фишке.

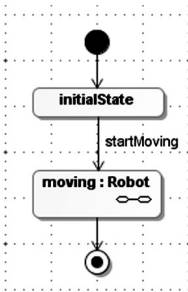


Рис. 3. Структурная диаграмма для класса «робот»

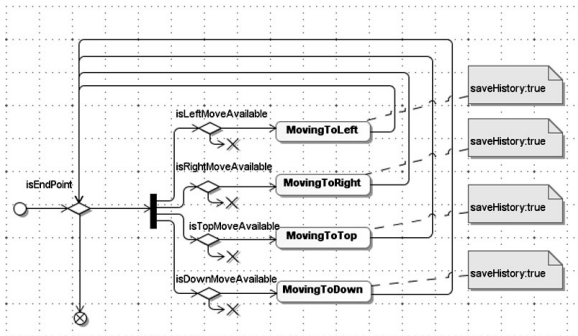


Рис. 4. Состояние moving.

III. Реализация с помощью сетей Петри

Построение цветной сети Петри (рис. 5) происходит по правилам преобразований UML-сети Петри [6—8].

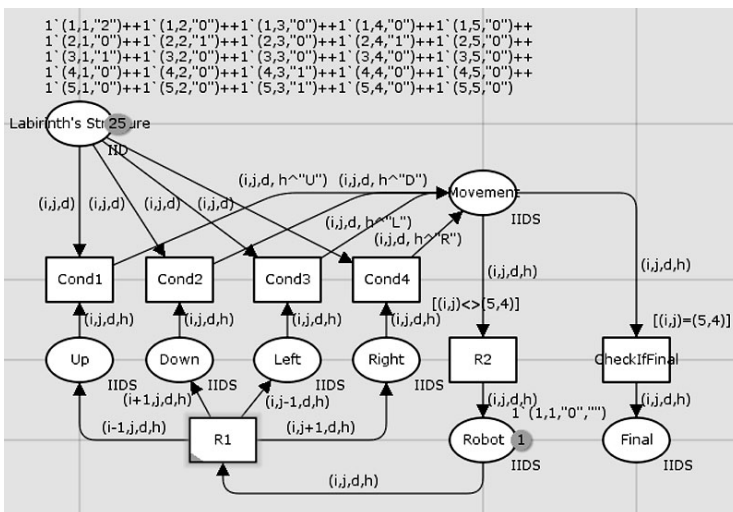


Рис. 5. Цветная сеть Петри, полученная из структурных диаграмм (рис. 3, 4)

Примечание *saveHistory: true*, изображенное на рисунке 4, указывает на сохранении истории в метке. Чтобы реализовать сохранение истории была добавлена переменная «*h*» к местам с типом данных *IIDS*. При срабатывании одного из переходов *Cond1*, *Cond2*, *Cond3* and *Cond4* к фишке добавляется история перемещений.

Примечания в UML диаграммах могут применяться для построения UML диаграмм, ориентированных на время.

Место *Final* может содержать только фишки, которые нашли выход из лабиринта. История передвижений, заложенная в фишке, позволяет отследить маршрут, по которому двигался «робот» до клетки «конец».

IV. Анализ сети Петри

Сеть Петри (рис. 5) была построена в программной среде CPN Tools, которая может быть использована для анализа систем. В ходе анализа системы был сформирован отчёт, представленный в таблице 1.

В сети присутствуют «мертвые» маркировки, что означает наличие в модели тупиковых состояний. Тупиковые состояния возникают, когда роботы не могут найти выход из лабиринта.

Таблица 1.

Отчет о пространстве состояний для системы (рис. 5).

Statistics	
State Space Nodes: 16571 Arcs: 68950 Secs: 300 Status: Partial	Пространство состояний модели состоит из 16571 узлов, 68950 дуг за 300 секунд .
Scc Graph Nodes: 16571 Arcs: 68950 Secs: 3	
Home Properties	
Home Markings None	Модель не имеет домашних маркировок.
Liveness Properties	
Dead Markings 6188 [16571,16570,16569, 16568,16567,...]	Сеть Петри содержит мёртвые маркировки.
Dead Transition Instances None	В модели отсутствуют мёртвые переходы.
Live Transition Instances None	
Fairness Properties	
No infinite occurrence sequences	Бесконечные последовательности отсутствуют.

V. Выводы

Представлен механизм преобразования UML диаграмм в сети Петри. Данную методику можно применять для более общего представления UML диаграммам и временных сетей Петри.

Ещё одним важным результатом является сохранение в метке истории её передвижений. История перемещений может дать информацию о движении метки по лабиринту до клетки “конец”, что может быть использовано для анализа систем.

Так как задание массива в программном пакете CPN Tools трудоёмко, можно предложить использование внешних программ, например Excel.

Список литературы

1. Воевода А.А. Марков А.В. О компактном представлении языков сетей Петри: сети с условиями и временные сети: сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010, № 2. С. 77—83.
2. Воевода А.А. Марков А.В. Тестировании UML-диаграмм с помощью аппарата сетей Петри на примере разработки ПО для игры «Змейка»: сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010, №3. С. 51—61.
3. Воевода А.А. Романников Д.О. Использование UML и временных сетей Петри при разработке программного обеспечения: сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010, № 3. С. 61—71.
4. Зимаев И.В. О возможности автоматической трансляции UML диаграмм деятельности в сети Петри: сб. науч. тр. НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2010, № 1. С. 149—156.
5. Воевода А.А. Романников Д.О. Зимаев И.В. Применение UML-диаграмм и сетей Петри при разработке встраиваемого программного обеспечения: научный вестник НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2009, №4. С. 169—175.
6. Коротиков С.В. Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного контроля и управления: дис. канд. техн. Наук / НГТУ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2008.
7. L. Baresi, M. Pezze, On formalizing UML with high-level Petri net, Concurrent object-oriented programming and Petri nets: advances in Petri nets. Berlin: Heidelberg. Springer, 2003. P. 276—304.
8. J. Campos, J. Merseguer, On the integration of UML and Petri nets in software development, Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Heidelberg. Springer, 2006. P. 19—36.
9. S. Bernardi, J. Merseguer Performance evaluation of UML design with Stochastic Well-formed Nets: The Journal of Systems and Software. 2007. — 80 p.

МОДЕЛЬ ГРУППИРОВКИ ОБЪЕКТОВ, ОСНОВАННАЯ НА БИНАРНЫХ ОТНОШЕНИЯХ

Пономарев Андрей Васильевич

ассистент СПбГЭТУ, г. Санкт-Петербург

E-mail: ponomarev.a.v@gmail.com

Различные практические постановки имеют в своей основе общую идею: образование групп из заданных объектов при определенных условиях и ограничениях. Многие из этих задач в настоящее время успешно решаются с применением тех или иных формальных моделей. Однако автору не удалось найти в литературе упоминания о попытках проанализировать и описать внутреннее родство таких задач, выделить общие идеи, подходы и методы, которые можно было бы применять последовательно, столкнувшись с той или иной задачей группировки объектов.

Ближе всего к намеченной автором цели находится область исследований, объединенная названием «кластерный анализ» [2]. Отличие в том, что в рамках кластерного анализа традиционно рассматривается группировка однородных объектов и каждый формируемый кластер тоже, в свою очередь, состоит из однородных объектов. В общем же случае, исходными данными для группировки могут быть объекты различных типов и искомые группы могут сами иметь определенные ограничения на соотношение объектов различных типов, входящих в нее. Хотя кластерный анализ, безусловно, является частным случаем группировки.

Под группировкой в данной работе понимается создание комплексных, сложных объектов из множества простых объектов наилучшим образом. Уточним это определение.

Пусть задано семейство множеств исходных объектов $\Theta = (O(1), O(2), \dots, O(k))$.

Базовой группой G на семействе исходных множеств назовем семейство множеств

$$G = (O(1)(G), O(2)(G), \dots, O(k)(G))$$

таких, что

$$O^{(i)}(G) \subseteq O^{(i)}, i \in \{1, \dots, k\}.$$

$O^{(i)}_G$ назовем компонентами группы.

Операции пересечения и объединения и отношение равенства определим естественным образом как покомпонентные операции над группами.

Группировку Γ на семействе исходных множеств определим как множество попарно не пересекающихся групп на этом семействе.

Группировка Γ называется *полной по* $O^{(i)}$, если $\cup O^{(i)}(\Gamma) = O^{(i)}$, при $G \in \Gamma$.

Группировка Γ называется *полной*, если она полная по любому из множеств семейства Θ .

Группировка Γ называется *частично полной*, если она не является полной, но в семействе Θ существует хотя бы одно множество $O^{(i)}$, по которому данная группировка является полной.

Ограниченной группой (ОГ) или группой с ограничениями называется базовая группа, на состав которой наложены дополнительные ограничения. Например, может быть задано, что в группу должен входить строго один объект из исходного множества $O^{(2)}$ и один или более объектов из исходного множества $O^{(1)}$. Это типичное ограничение на состав (структуру) иерархической группы.

На практике обычно ставится задача нахождения хороших (в ряде случаев, оптимальных) группировок на различных классах ОГ. Для точной постановки этой задачи нужно определить способ сравнения группировок. Самый простой вариант — поставить каждому варианту группировки в соответствие число и решать задачу поиска такой группировки на исходном семействе множеств, которой соответствует максимальное (или минимальное) число. Способ оценки группировки будем называть *системой показателей (СП)*.

Структура системы показателей может сильно варьироваться в зависимости от приложения задачи группировки. С другой стороны, эта структура решающим образом влияет на методы поиска оптимальных группировок.

Итак, для определения задачи группировки необходимо задать:

- 1) семейство исходных множеств Θ ;
- 2) класс ограниченной группы — то есть, набор ограничений на соотношение объектов разных типов внутри группы;
- 3) тип группировки по отношению к покрытию исходных множеств: полная, частично полная, неполная;
- 4) систему показателей.

В зависимости от конкретной структуры исходных множеств объектов, ограничений и системы показателей образуются частные постановки общей задачи группировки. Варьирование значений компонент является одной из основ классификации задач группировки.

Важным критерием классификации задач группировки является структура внутргрупповых отношений. По этому критерию можно выделить:

- одноранговую группировку;
- централизованную группировку.

Задача группировки будет являться одноранговой в том случае, когда выделяемые группы являются однородными и состоят из объектов, одинаковых по своей роли в группе. Таковы большинство вариантов задачи кластеризации.

Централизованная группировка характеризуется тем, что в каждой группе выделяется два (или более) видов объектов, находящихся в отношении «центр — спутник» и класс ОГ и система показателей задачи группировки формулируются уже через взаимодействие объектов этих двух видов.

Здесь сразу можно выделить две подкатегории: двухуровневая (простейшая) централизованная группировка и многоуровневая централизованная группировка.

Двухуровневая централизованная группировка предполагает, что семейство исходных множеств Θ состоит из двух множеств: множества первичных объектов $O^{(1)}$ и множества потенциальных центров групп $O^{(2)}$, относительно которых происходит объединение первичных объектов. При рассмотрении этого вида группировок будем пользоваться альтернативным обозначением этих множеств S и C соответственно.

Класс ОГ в задачах данной категории может содержать самые разнообразные ограничения, но обязательно присутствует требование того, чтобы группа включала ровно один объект из множества C . В сочетании с общими для любых группировок требованиями, из этого следует однозначное соответствие между группами и потенциальными центрами. Это свойство открывает путь к достаточно простым математическим постановкам и эффективным алгоритмам поиска оптимальных группировок для задач, относящихся к этой категории.

Для того чтобы сформулировать задачу группировки как задачу математического программирования, нужно показать способ перехода от терминологии описания задачи группировки к трем составляющим задачи МП: набору переменных, набору ограничений и целевой функции.

Рассмотрим для примера способ перехода к задаче математического программирования для двухуровневой централизованной группировки.

Пусть $m = |C|$, $n = |S|$. Введем бинарные переменные y_j ($1 \leq j \leq m$), каждая из которых соответствует образованию группы с центром в c_j , и переменные x_{ij} ($1 \leq j \leq m$, $1 \leq i \leq n$), каждая из которых соответствует присоединению объекта s_i к группе с центром в c_j .

Целевая функция будет зависеть от системы показателей задачи группировки. В основе системы показателей, как правило, находится

отображение $D: S \times C \rightarrow R$, задающее стоимость (или, наоборот, эффективность) присоединения s_i к группе с центром в c_j . Мы будем рассматривать D как эффективность, и решать задачу максимизации эффективности группировки.

Тогда базовая задача двухуровневой централизованной группировки с такой (простейшей) системой показателей будет записываться следующим образом.

$$\text{Максимизировать } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} d_{ij}$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, i \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

$$x_{ij} \leq y_j, i \in \{1, \dots, n\}, j \in \{1, \dots, m\} \quad (2)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\}.$$

Здесь условие (1) выражает общее для всех группировок требование вхождения объекта не более, чем в одну группу. При решении задачи полной по S группировки знак в этом ограничении должен быть заменен на строгое равенство.

Ограничение (2) выражает требование того, что объект s_i должен присоединяться только к действительному центру.

Разработаны программные модули, реализующие различные алгоритмы решения задачи двухуровневой централизованной группировки.

Описанная модель была применена к практической задаче геолого-экономического районирования территорий [1], которая была представлена как частный случай задачи группировки со стоимостью активации. В результате этого, во-первых, получен вариант районирования, в значительной мере согласующийся с результатами, получаемыми экспертами в области природопользования, а во-вторых, сделан вывод о том, что данный подход позволяет эффективно моделировать и решать задачи группировки объектов.

Список литературы:

1. Мустафин Н., Пономарев А., Савосин С. Методы и алгоритмы группировки геологических объектов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. т. 4. с. 71-74.
2. Elavarasi Anitha S., Akilandeswari J. A Survey on Partition Clustering Algorithms // International Journal of Enterprise Computing and Business Systems. Vol. 1 Issue 1 January 2011.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОДЕКА, НА ОСНОВЕ ЧИРПЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ДЛЯ КОМПРЕССИИ МУЛЬТИМЕДИЙНОЙ ИНФОРМАЦИИ С КОДЕКАМИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ФУРЬЕ И ВЕЛЬВЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Тулский Иван Николаевич

аспирант СФУ, г. Красноярск, ОАО "ИСС" г. Железногорск

E-mail: irina_altair@mail.ru

Статья посвящена повышению эффективности и улучшению эксплуатационных характеристик сервисов потоковой доставки мультимедиа сообщений подвижным абонентам путём разработки альтернативных алгоритмов обработки данных, соответствующих специфике мобильных сетей и терминалов связи.

Существует множество алгоритмов и математических аппаратов для сжатия изображения и звука для применения в радиосетях и телекоммуникационных сетях.

Условно алгоритмы компрессии мультимедийной информации можно разделить на два больших класса:

Сжатие без потерь информации, как следствие с оригинальным качеством.

Сжатие с потерями информации, и как следствие с ухудшением качества передаваемой мультимедиа информации.

Данное исследование отражает возможность применения математического адаптивного чирплет преобразования для реализации компрессии мультимедийной информации в цифровых беспроводных радиосетях типа 3G, 4G.

Сравнение кодека на основе математического чирплет преобразования будет сравниваться с кодеками на основе математических Вельвет и Фурье преобразований как получившими наибольшее распространение в алгоритмах сжатия с потерями.

Следует сказать, что полной и точной оценки для сравнения характеристик сжатия с потерями не существует, поэтому в качестве объективного параметра оценки качества принято пиковое отношение сигнала к помехе PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) для группы кадров. Выражение 1 для определения PSNR представлено ниже. Проще всего его определить через среднеквадратичное отклонение (MSE), которое для двух монохромных изображений I и K размера $m \times n$, одно из которых считается зашумленным приближением другого.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2 \quad (1)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right)$$

где MAX_i — это максимальное значение, принимаемое пикселем изображения. Когда пиксели имеют разрядность 8 бит, MAX_i = 255. Вообще говоря, когда значения сигнала представлены линейно с В битами на значение, максимально возможное значение MAX_i будет 2^B-1.

Для цветных изображений с тремя компонентами RGB на пиксель применяется такое же определение PSNR, но MSE считается по всем трем компонентам (и делится на утроенный размер изображения).

Существует огромное множество методик определения качества сжатого видеопотока, но как основной (характеристический показатель качества) используется PSNR.

Необходимо отметить, что предложенный метод позволяет отказаться от «привязки» абонента к какому-либо выбранному закодированному видеопотоку с фиксированной скоростью, предоставляя абонентам сервис с наилучшим возможным качеством, используя ту часть единого потока данных, которая может быть принята при данной скорости абонентского подключения.

Необходимо отметить, что сжатие и восстановление видео-последовательности с использованием чирплет и вельвет преобразований очень схожи по своей структуре. По сути это набор низкочастотных и высокочастотных КИХ фильтров. Различия заключается в том, что при использовании вельвет преобразования, применяются различные типы вельвет функций (материнских оконных вельветов), а при чирплет преобразовании применяется разложение сигнала на основе ЛЧМ материнского сигнала.

Рассмотрим случай, когда в силу каких-либо обстоятельств на вход декодера подана не вся группа кадров, а лишь несколько первых кадров. Например, эта ситуация может возникнуть при резком ухудшении канала связи, когда скорость резко падает, и принять весь запланированный пакет данных клиентское приложение уже не в состоянии. В таблицах 1, 2, 3 и 4 приведены результаты экспериментов.

Как видно из таблиц при полном приеме кадров характеристики лучше у вельвет кодера, однако при больших потерях чирплет кодер имеет более лучшие характеристики, данные характеристики,

обуславливаются тем, что вельвет кодер имеет возможность использовать КИХ фильтры с различными оконными функциями, однако при большой потере кадров в группе, чирплет кодер имеет лучшую адаптивность, в виду нелинейности в области низких частот.

Таблица 1.

**Восстановление при неполном приёме закодированных кадров
(кодирование чирплет кодером)**

Количество кадров на входе	Потери кадров в группе, %	Эквивалент скорости потока, кбит/с	PSNR, дБ
16	0	512	32,3
8	50,0	256	26,1
4	75,0	128	24,3
2	87,5	64	18,3

Таблица 2.

**Восстановление при неполном приёме закодированных кадров
(кодирование вельвет кодером)**

Количество кадров на входе	Потери кадров в группе, %	Эквивалент скорости потока, кбит/с	PSNR, дБ
16	0	512	32,7
8	50,0	256	26,2
4	75,0	128	22,1
2	87,5	64	17,4

Благодаря гибкости предложенного алгоритма, даже в случае существенного снижения скорости принимаемого потока данных декодер в состоянии восстановить фон в видеопоследовательности и движение объектов.

Кадры видеопоследовательности содержат наиболее важную информацию в достаточно малой области низких частот, и, вследствие прогрессивного кодирования, мало подвержены влиянию различных ошибок. В то же время, чирплет-преобразование, применённое к временной области, переносит наиболее важную глобальную информацию, содержащуюся в группе кадров, в первые два кадра (первый — фон, второй — базовая информация о движении). Это свойство, очевидно, окажет сильное влияние на оценку помехоустойчивости закодированного потока.

В таблицах: 3, 4 приведены результаты восстановления видеосигналов при различных компьютерных моделях внесения ошибок в процессе передачи по радиоканалу — случайных битовых ошибках, потере пакета и потере синхронизации битового потока. Эксперименты были произведены на двух различных тестовых файлах, как для предложенного алгоритма, так и для широко распространённых коммерческих алгоритмов — MPEG-4, DivX511, H.263.

Таблица 3.

Оценка помехоустойчивости при внесении случайных битовых ошибок в видеопоследовательность

BER	Фрагмент	Оценка PSNR, дБ				
		MPEG-4	DivX511	H.263	Wavelet	Chirplet
10^{-2}	1	18,4	18,1	16,7	26,1	27,0
	2	23,2	21,1	20,1	28,3	29,3
10^{-3}	1	24,2	24,1	23,8	28,8	29,5
	2	26,8	26,4	25,6	30,5	30,7
10^{-4}	1	30,9	29,9	28,7	31,1	30,5
	2	31,7	30,5	28,9	37,3	37,0
0	1	32,1	31,8	30,0	31,9	30,7
	2	34,5	35,2	32,7	37,8	36,3

Таблица 4.

Оценка помехоустойчивости при потере пакетов данных во время передачи видеопоследовательности

Потеря пакета, байт	Фрагмент	Оценка PSNR, дБ				
		MPEG-4	DivX511	H.263	thirplet	Wavelet
64	1	14,5	16,7	14,1	27,2	26,3
	2	15,7	17,2	16,1	28,4	28,3
16	1	21,0	20,1	19,8	28,9	28,9
	2	24,9	23,7	22,9	31,0	30,0
4	1	29,7	28,1	27,9	31,8	30,7
	2	29,9	29,0	28,4	37,5	37,7
0	1	32,1	31,8	30,0	31,9	33,0
	2	34,5	35,2	32,7	37,8	38,2

Для других видов мультимедийной информации: статичных изображений и аудио-последовательностей, результаты качественно не отличались.

Предложенный математический аппарат, на основе чирплет преобразования, для сжатия мультимедийной информации показал более высокую помехоустойчивость по сравнению с широко распространёнными алгоритмами, обеспечив при этом сравнимую или более высокую степень компрессии данных.

Все выше перечисленные характеристики показывают, тот факт, что применение чирплет кодера, применительно к беспроводным радиосетям, имеет ряд преимуществ, по сравнению с вейвлет и Фурье алгоритмами компрессии потокового видео трафика.

Список литературы:

1. Глинченко А. С. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие КГТУ, Красноярск 2001 г.
2. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам — НИЦ, Ижевск 2001 г.
3. Маала С. Вэйвлеты в обработки сигналов — Мир, Москва 2005 г.
4. Штарк Г. Г. Применение вейвлетов для ЦОС. — Техносфера, Москва 2007 г.
5. Яне Б. Цифровая обработка изображений — Техносфера, Москва, 2007.-337 с.

СЕКЦИЯ 6.

ЭНЕРГЕТИКА

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ В ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУЕ И ПЛАМЕНИ

Абдуракипов Сергей Сергеевич

студент НГУ, г. Новосибирск

E-mail: s.s.abdurakipov@gmail.com

Дулин Владимир Михайлович

к.ф.-м.н., НГУ, ИТ СОРАН, г. Новосибирск

Турбулентные струйные течения широко распространены в различных технических приложениях: в водопроводах, газопроводах, нефтепроводах, в камерах сгорания, в ракетных и газотурбинных двигателях, при сжигании попутного газа и т.д. Формирование крупномасштабных вихревых структур, свойственное турбулентным течениям, интенсифицирует процессы тепло- и массообмена, поэтому способы управления этим процессом привлекают повышенный интерес с точки зрения, как фундаментальных исследований, так и практического применения. В частности, закрутка часто используется для стабилизации пламен предварительно перемешанной смеси, так как интенсивные турбулентные флуктуации, вызванные крупномасштабными спиралевидными вихрями, обеспечивают интенсивный тепло- и массообмен между свежей и сгоревшей смесью в области возвратного течения.

В закрученных струях профили осевой скорости позволяют возникать неустойчивостям, индуцированным в сдвиговом слое, похожим на те, которые имеют место в незакрученных струях. В слабо закрученных и незакрученных струях неустойчивость Кельвина-Гельмгольца приводит к формированию доминирующей вихревой структуры — вихревых колец, которые при малой закрутке наклоняются вниз по течению. Дальнейшее увеличение закрутки потока приводит к появлению азимутального сдвигового слоя и центробежной неустойчивости. Этот режим течения характеризуется присутствием спиральных волн, которые заменяют вихревые кольца в

качестве доминирующей вихревой структуры. Наконец, при определенных условиях, когда скорость закрутки достаточно велика, в закрученных струях, как известно, происходит явление распада вихревого ядра. После распада вихря в потоке сосуществуют две сильные спиральные моды [1].

Все вышеперечисленное делает необходимым исследование пространственной структуры, а также понимание взаимодействующих конкурирующих динамических механизмов, возникающих в закрученных турбулентных потоках и определяющих их эволюцию. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование пространственной структуры сильно закрученной струи воды и закрученного поднятого пламени с использованием самых современных методов анализа турбулентных течений Stereo PIV и POD.

Proper Orthogonal Decomposition (POD) является основным статистическим методом, наиболее часто применяющимся при анализе турбулентных потоков. Подробно основы этой процедуры изложены в работах [2,3]. Применение метода к большому набору мгновенных полей скорости позволяет значительно сократить размерность и получить набор временных и пространственных базисных функций (главных мод), которые содержат максимально возможное количество турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) потока [2,3]. Временные базисные функции также называют временными POD коэффициентами. Энергия POD моды определяется соответствующим собственным значением [2; 3]. Это обычно означает, что первые POD моды связаны с крупномасштабными структурами в потоке. Другими словами, если в потоке имеются доминирующие структуры, они обязательно будут отражены в первых двух POD модах. Следовательно, мгновенное поле скорости \mathbf{u} может быть удовлетворительно восстановлено на основе только этих мод ϕ_i , взятых с временными коэффициентами a_i : $\mathbf{u}^* = a_1\phi_1 + a_2\phi_2$, где \mathbf{u}^* — низкоразмерное представление \mathbf{u} .

Бесконтактный оптический метод Stereo PIV (Particle Image Velocimetry) был использован для получения мгновенных полей скорости потока, а кадровый POD [2], примененный к ансамблю из 1000 мгновенных полей скорости, — для извлечения крупномасштабных когерентных структур. В качестве экспериментального стенда использовался замкнутый гидродинамический контур и открытая модельная горелка, подробно описанные в [4; 5]. Сопло диаметром $d = 15$ мм организовывало изотермическую сильно закрученную струю с выраженным распадом вихревого ядра и зоной

рециркуляции типа «пузырь». Число крутки потока определялось геометрией завихрителя и равнялось $S = 1.0$.

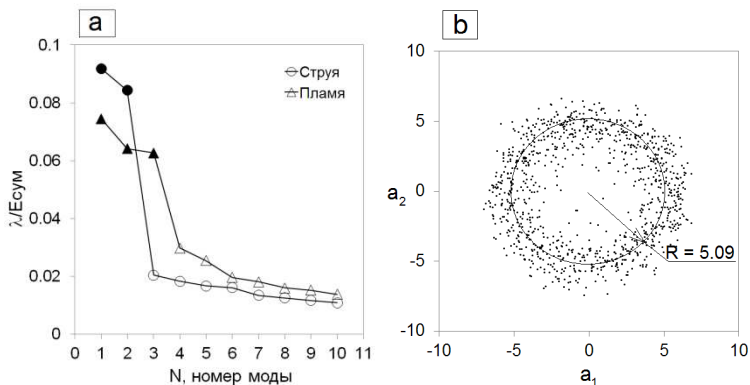


Рисунок 1. а) POD спектр десяти наиболее энергоемких мод и б) зависимость временных POD коэффициентов a_1 и a_2 двух главных мод $\phi_{1,2}$ сильно закрученной струи воды

На рис. 1 а представлен нормированный POD спектр, показывающий наличие двух главных POD мод для закрученной струи и трех в случае закрученного поднятого пламени. В случае закрученной струи воды первые две POD моды содержат $9.2\% + 8.4\% = 17.6\%$ ТКЭ потока, для поднятого пламени эта величина составляет $7.4\% + 6.4\% + 6.2\% = 20\%$. На рис. 2 а показана наиболее интенсивная нулевая мода разложения — классическое среднее по ансамблю, полностью совпадающая со средним полем скорости. Отчетливо видна зона рециркуляции, имеющая форму пузыря. На мгновенном поле скорости рис. 2 б можно наблюдать крупномасштабные турбулентные пульсации. Согласно первой POD моде, представленной на рис. 2 с, интенсивное вихревое движение в основном локализовано вблизи сопла, затем спадает на расстояниях $1-2d$ вдоль оси струи. Сравнение мгновенного поля скорости и его низкоразмерного представления $a_1\phi_1$, построенного на основе первой POD моды ϕ_1 , показано на рис. 2 б и d.

Авторами работы было замечено, что положения вихрей на двух модах смещены друг относительно друга на половину расстояния между соседними вихрями, следовательно, любое промежуточное положение вихрей может быть представлено линейной комбинацией

двух POD мод. Таким образом, анализ двух POD мод показал, что они связаны с прецессией вихревого ядра и парой спиралевидных структур, образующихся во внутреннем и внешнем слое смешения.

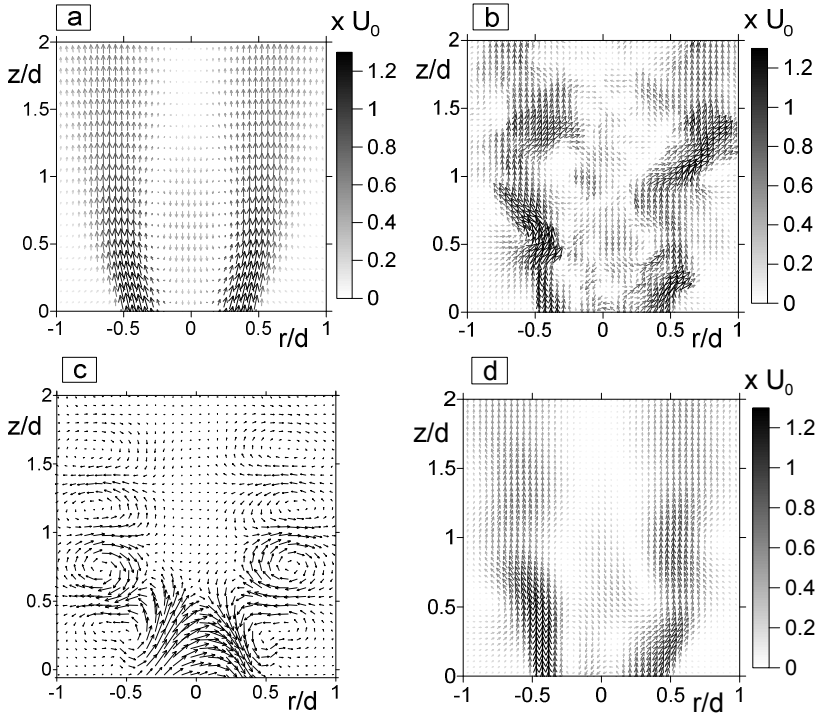


Рисунок 2. а) Среднее поле скорости и б) мгновенное поле скорости в плоскости потока, с) первая POD мода ϕ_1 пульсаций скорости и д) низкоразмерное представление $a_1 \phi_1$ мгновенного поля скорости, построенное на основе первой POD моды ϕ_1 . Среднерасходная скорость потока $U_0 = 0.52$ м/с; число Рейнольдса $Re = 8900$.

Как можно наблюдать из рис. 1 б, коэффициенты a_1 и a_2 двух главных мод не являются независимыми и расположены на кольце $\langle a_1^2 + a_2^2 \rangle = R^2$, средний радиус которого $R = 5.09$. Аналогичная картина наблюдается и для первых двух мод поднятого пламени. Это говорит о том, что флуктуации скорости в закрученном турбулентном потоке имеют сложную структуру, связанную с интенсивным вихревым движением и тепловым расширением за фронтом пламени.

Можно предположить, что в случае поднятого пламени именно тепловое расширение является причиной появления третьей POD моды. Это подтверждается тем, что при сокращении области POD анализа до $[r \times z] = [2d \times 2d]$ третья мода пропадает, и когерентная структура потока также определяется двумя POD модами.

В данной работе 3D когерентная структура потока, представленная на рис. 3, была восстановлена на основе двух POD мод и среднего поля скорости:

$$\mathbf{u}^*(\varphi) = \mathbf{u}_{\text{ср}} + R(\boldsymbol{\phi}_1 \cos(\varphi) + \boldsymbol{\phi}_2 \sin(\varphi))$$

где $\mathbf{u}^*(\varphi)$ — низкоразмерное представление реального поля скорости,

$\mathbf{u}_{\text{ср}}$ — среднее поле скорости,

R — средний радиус кольца,

$\boldsymbol{\phi}_{1,2}$ — первая и вторая POD моды,

φ — фазовый угол, представляющий различные положения

вихря.

На изоповерхностях критерия λ_2 идентификации вихревых структур (рис.3 a,b) хорошо различимы вихревое ядро закрученной струи (2), а также внешний (3) и внутренний (4) вторичные спиралевидные вихри. Эти вторичные вихри, содержащие вторичную азимутальную завихренность, являются левовинтовыми спиралями с малым шагом. Все найденные спиралевидные структуры присутствуют и в закрученном пламени. Полученный результат хорошо согласуется с работой [6], где пара вторичных спиралевидных структур, вызванная прецессией вихревого ядра, была получена посредством фазового усреднения экспериментальных данных лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА). Главной ценностью работы является демонстрация возможности использования метода POD в качестве основного инструмента для исследования трехмерной пространственной структуры крупномасштабных вихревых образований в турбулентных струйных течениях.

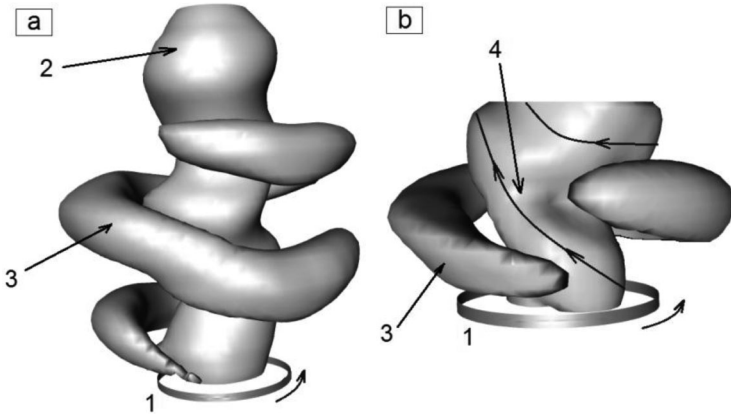


Рисунок 3. 3D когерентная структура сильно закрученной струи воды, визуализированная посредством изоповерхностей критерия *a) $\lambda_2 = -40000$ и b) $\lambda_2 = -70000$. 1. Сопло 2. Вихревое ядро закрученной струи 3,4. Внешний и внутренний спиралевидные вихри.*

Список литературы:

1. H. Liang, T. Maxworthy. An experimental investigation of swirling jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. vol. 525, pp. 115—159.
2. L. Sirovich. Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: Coherent structures. *Q. Appl. Maths*. 1987. vol. 45(3), pp. 561—571.
3. P. Holmes, J.L. Lumley, G. Berkooz. *Turbulence, coherent structures, dynamic systems and symmetry*. Cambridge University Press. 1996. pp. 86—128.
4. S.V. Alekseenko, V.M. Dulin, Y.S. Kozorezov, D.M. Markovich. Effect of axisymmetric forcing on the structure of a swirling turbulent jet. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2008. vol. 29, num. 6, pp. 1699—1715.
5. S.V. Alekseenko, V.M. Dulin, Y.S. Kozorezov, D.M. Markovich. Flow Structure of Swirling Turbulent Propane Flames. *Flow Turbulence Combust.* 2011, pp. 1—27.
6. C.E. Cala, E.C. Fernandes, M.V. Heitor, S.I. Shtork. Coherent structures in unsteady swirling jet flow. *Experiments in Fluids*. 2005. vol. 40, num. 2, pp. 267—276.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУПЕРКАВИТАЦИОННОМ ИСПАРИТЕЛЕ

Кулагин Владимир Алексеевич

д. т. н., профессор СФУ, г. Красноярск

E-mail: v.a.kulagin@mail.ru

Пьяных Татьяна Анатольевна

аспирант СФУ, г. Красноярск

E-mail: t.pyanykh@gmail.com

Вопросы рационального использования водных ресурсов приобретают сегодня особо важное значение в мировом масштабе. В настоящее время все больше стран начинают принимать срочные меры по предотвращению водного кризиса. Современное производство тепловой и электрической энергии сопровождается использованием значительного количества пресной воды и сбросом в окружающую среду больших объемов сточных вод разного уровня загрязненности. Проблема дефицита пресной воды наряду с такими вопросами, как очистка сточных вод и борьба с загрязнениями водоемов, может быть решена путем максимально возможного использования в промышленности минерализованных вод и их опреснения.

В настоящее время известны более двадцати методов опреснения соленых и солоноватых вод. Некоторые из методов доведены до промышленной реализации в крупных масштабах, другие находятся в стадии поисковых исследований. Заметные экологические преимущества, свойственные термическому методу водоподготовки, а также возможность переработки с его помощью промышленных минерализованных сточных вод, объясняют широкое распространение этого метода.

Однако несовершенство процессов теплообмена и испарения, накипеобразование, большие габариты, невысокая энергонапряженность теплообменной поверхности и ряд других недостатков требуют не только усовершенствования существующих термических установок для обессоливания, но и создания новых аппаратов с более высокими технико-экономическими характеристиками.

Использование режимов развитой кавитации позволяет исключить существенные недостатки термического метода опреснения. Кавитационный метод интенсификации теплообмена заключается в том, что при обтекании недогретой жидкостью

кавитатора в рабочем модуле суперкавитационных испарительных камер образуются суперкаверны, из которых производится пароотбор [1]. На рисунке 1 представлена схема суперкавитационного испарения.

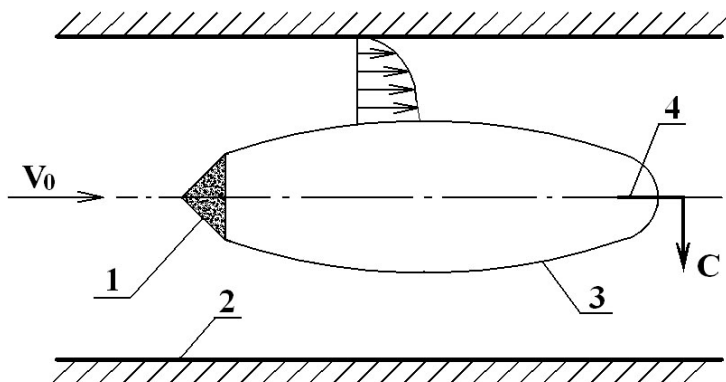


Рисунок 1. Физико-механическая модель суперкавитационного испарения: 1 — кавитатор, 2 — труба круглого сечения, 3 — суперкаверна, 4 — отбор пара из каверны

Эффективность суперкавитационных испарителей главным образом определяется величиной поверхности испарения, которая в свою очередь зависит от многих факторов, определяющими из них являются величина отбора пара, число кавитации, число Фруда, степень стеснения потока, величина недогрева рабочей жидкости, физические свойства жидкости.

Одновременное существование граничной динамики, фазового перехода и сильного изменения плотности значительно затрудняет задачу исследования рабочих процессов суперкавитационных испарителей.

В данной работе для оценки поверхности кавитационного испарения используется модель двухфазного гомогенного потока, в которой поток рассматривается как гомогенная смесь. Эта модель основывается на предположении локального кинематического и термодинамического равновесия между фазами и не предполагает поверхность раздела между двумя несмешивающимися жидкостями. Объемная доля фазы может изменяться от нуля до единицы, в зависимости от занимаемого пространства в двухфазном потоке. Задача рассматривается в стационарной постановке и предполагает решение следующих уравнений (1)-(6):

уравнения неразрывности для каждой фазы α

$$\nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \vec{u}_m) = \dot{S}_{lv}, \quad (1)$$

где r_α — объемная доля фазы α ;

ρ_α — плотность фазы α , кг/м³;

\dot{S}_{lv} — массовая скорость образования фазы, кг/м³с;

\vec{u}_m — скорость смеси, м/с;

уравнение движения для смеси

$$\nabla \cdot \left(\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m - \mu_m \left(\nabla \vec{u}_m + (\nabla \vec{u}_m)^T \right) \right) = -\nabla P \quad (2)$$

где ρ_m — плотность смеси, кг/м³;

μ_m — коэффициент кинематической вязкости смеси, Па·с;

P — давление, Па.

Турбулентность учитывается использованием $k - \varepsilon$ модели.

Уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k , м²/с², и ее диссипации ε , м²/с³:

$$\nabla \cdot (\rho_m k \vec{u}_m) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G - \rho_m \varepsilon \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho_m \varepsilon \vec{u}_m) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

где G — скорость генерации турбулентности,

μ_t — турбулентная вязкость. Эмпирические константы имеют следующие значения: $\sigma_k=1$; $\sigma_\varepsilon=1,3$; $C_1=1,44$; $C_2=1,92$.

Так как фазы должны полностью заполнять весь объем, то принимается следующее условие:

$$\sum_{\alpha}^N r_\alpha = 1, \quad (5)$$

Для массовой скорости образования фазы используется кавитационная модель [2]:

$$\dot{S}_{lv} = \begin{cases} F_{vap} \frac{3r_{nuc}(1-r_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho}} & \text{àñèè} P < P_v \\ F_{cond} \frac{3r_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2|P_v - P|}{3\rho}} & \text{àñèè} P > P_v \end{cases} \quad (6)$$

где r_{nuc} — объемная доля зародышей («ядер») кавитаций,

R_B — радиус зародыша кавитации, м.

При моделировании применялись следующие параметры модели: $R_B = 10^{-6}$ м, $r_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$, $F_{vap} = 50$ и $F_{cond} = 0,01$.

Для апробации модели были проведены расчеты на холодной воде (20 °С), так как такие режимы можно считать предельными по температуре ведения процесса для кавитационного испарения. В качестве кавитатора использовался конус с диаметром основания 16 мм, и углом раствора конуса 53°. Степень стеснения потока принималась равной 0,29. Численный эксперимент проводился при постоянном значении числа Фруда 37,4.

На рисунке 2, в качестве примера, представлена доля пара в смеси при различных числах кавитации.

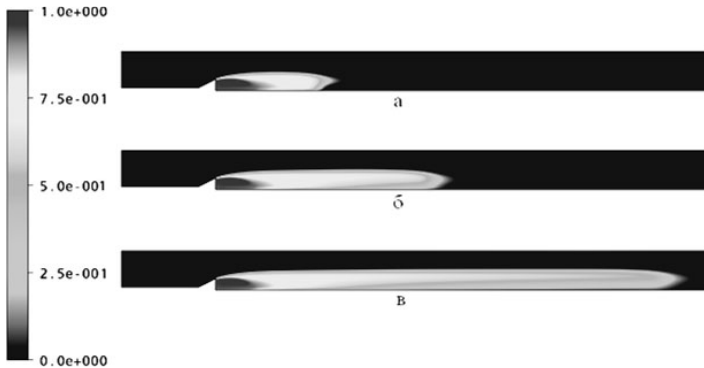


Рисунок 2. Расчетные результаты распределения доли пара при разных числах кавитации: а — число кавитации 0,46; б — число кавитации 0,465; в — число кавитации 0,47

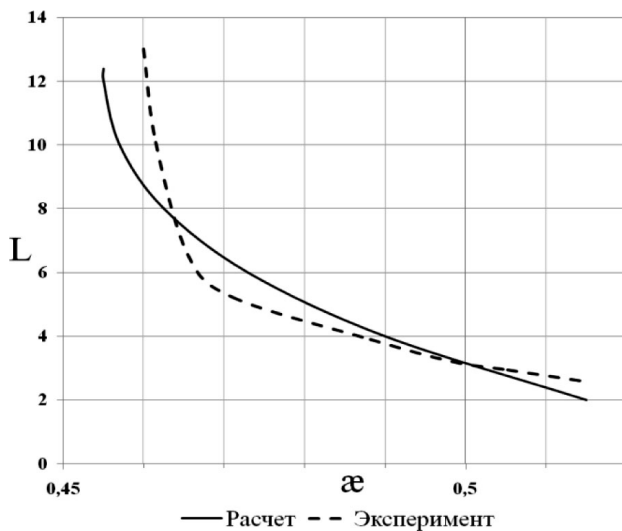


Рисунок 3. Зависимость относительной длины каверны от числа кавитации

На рисунке 3 отображена зависимость относительной длины каверны от числа кавитации.

Анализ полученных результатов показывает, что при постоянных значениях коэффициента стеснения потока и числа Фруда увеличение числа кавитации приводит к росту размеров каверны.

Суперкавитационный метод является перспективным способом опреснения и требует дальнейшего изучения. Результаты проведенных исследований показывают, что представленную модель можно использовать для анализа и совершенствования рабочих процессов в суперкавитационных испарителях.

Список литературы:

1. Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. Кавитационная технология: монография. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. — 200 с.
2. Philip J.Z. A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics / Philip J. Zwart, Andrew G. Gerber, Thabet Belamri // International Conference on Multiphase Flow. 2004. №152. — p. 45—56.

СЕКЦИЯ 7.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ

Бажинов Алексей Николаевич

*инженер-программист, Управления информационных технологий
ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет»,*

г. Череповец

E-mail: n_Balex@mail.ru

Эффективное управление любым промышленным объектом возможно только в случае, когда основные закономерности, присущие объекту, определены и представлены в виде математических моделей [5, с. 35].

Потребление электроэнергии в металлургической промышленности зависит от множества производственных и технологических факторов, набор которых не постоянен и зависит от характера прогнозирования и объекта энергопотребления [6, с. 102].

Исходные данные для прогнозной модели электропотребления могут быть взяты из энергетического баланса объекта, которым может быть агрегат, например дуговая сталеплавильная печь, цех, производство, предприятие, отрасль [6, с. 148].

Процесс прогнозирования электропотребления предприятием металлургического профиля разбит на этапы:

Сбор данных для обучения: набор данных для обучения должен удовлетворять как минимум двум критериям: репрезентативность — данные должны иллюстрировать истинное положение вещей в предметной области и непротиворечивость — противоречивые данные в обучающей выборке приведут к плохому качеству обучения сети.

Предобработка данных: исходные данные преобразуются к виду, в котором их можно подать на входы сети. Каждая запись в файле данных называется обучающей парой или обучающим вектором.

Обучающий вектор содержит по одному значению на каждый вход сети и по одному значению для каждого выхода сети. Нормализация выполняется, когда на различные входы подаются данные разной размерности. Например, если на первый вход сети подается величина со значениями от нуля до единицы, а на второй — от ста до тысячи, то значения на втором входе будут всегда оказывать существенно большее влияние на выход сети, чем значения на первом входе. При нормировке размерности всех входных и выходных данных сводятся.

К трансформированным данным применяются методы более глубокого анализа. На этом этапе выявляются скрытые зависимости и закономерности в данных, на основании которых строятся различные модели. Модель представляет собой шаблон, который содержит в себе формализованные знания.

Этап интерпретации предназначен для того, чтобы из формализованных знаний получить знания на языке предметной области, т.е. получить численное прогнозное значение электропотребления на заданный интервал упреждения.

Последним этапом является тиражирование знаний — предоставление экспертам-энергетикам предприятия возможности практического применения построенных моделей.

Для восстановления пропущенных и редактирования аномальных значений в рядах ретроспективной информации будем использовать Zet-алгоритм. Данный алгоритм учитывает закономерности ряда, может работать как с одномерными рядами данных, так и с таблицами данных, состоящих из множества взаимосвязанных рядов, указывает случаи, в которых имеющихся данных недостаточно для восстановления пропусков. Особо следует отметить возможности этого метода при восстановлении групповых пропусков в таблицах данных. Ни один из остальных исследуемых методов не способен выполнить такую задачу с приемлемой точностью, в то время как Zet-алгоритм показывает хорошие результаты [1, с. 241].

У данного метода есть ограничения. Например, между данными должна прослеживаться причинно-следственная (вероятностная) связь, а количество существующих наблюдений, по которым восстанавливаются пропуски, не должно быть малым. Однако специфика задачи прогнозирования электропотребления устраняет данные ограничения в сути своей постановки.

В табл. 1 приведена зависимость ошибок восстановления данных от количества пропусков.

Таблица 1.

Ошибка восстановления данных в зависимости от количества пропусков

Пропущено значений, %	Относительная ошибка восстановления
1	0,011
5	0,039
10	0,107
15	0,179
20	0,198
30	0,245
40	0,266
50	0,354
60	0,501
70	0,635

Было отмечено, что потребление электроэнергии в металлургической промышленности зависит от множества производственных и технологических факторов, набор которых не постоянен и зависит от характера прогнозирования и объекта энергопотребления.

Сокращение числа независимых переменных призвано уменьшить размерность модели не только с тем, чтобы удалить из нее все незначимые признаки, не несущие в себе какой-то полезной для анализа информации, и тем самым упростить и разгрузить модель, но и чтобы устранить избыточные признаки. Дублирование информации в составе избыточного признака не просто не улучшает качество модели, но и порой, наоборот, ухудшает его (как, например, в случае с мультиколлинеарностью) [4, с. 231].

В качестве метода определения основных влияющих факторов на потребление электроэнергии будем использовать математический аппарат деревьев принятия решения [2, с. 96].

Вычисления значимости атрибутов показали, что основными факторами, определяющими достоверность краткосрочного прогноза потребления электроэнергии в крупном металлургическом промышленном центре, являются автокорреляционные: потребление электроэнергии в предыдущий день, два дня и семь дней назад, а также объем производства в предыдущий день, статус дня, среднесуточная температура воздуха и долгота светового дня.

Процент значимости этих факторов на величину электропотребления приведен в табл.2.

Таблица 2.

Значимость основных факторов для прогнозной величины электропотребления в задаче суточного прогнозирования

№ параметра	Параметр	Значимость, %
1	Потребление электроэнергии в предыдущий день	47
2	Объём производства в предыдущий день	18
3	Потребление электроэнергии два дня назад	10
4	Потребление электроэнергии неделю назад	8
5	Статус дня	7
6	Среднесуточная температура воздуха	6
7	Долгота дня	4

Для непосредственного прогнозирования величин электропотребления используется нейро-нечеткая сеть. Обучение нейро-нечеткой сети происходит на массивах ретроспективных данных. Информационные массивы включают информацию об электропотреблении, а так же данные производственных и технологических факторов, определяющих профиль и величины фактического потребления электроэнергии цехом (объем поставок сырья, объем самого производства и т. д.). В процессе обучения нейро-нечеткая сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искаженных данных. На рис. 1 представлен график прогнозных величин потребления электроэнергии предприятием металлургического профиля.



Рисунок 1. Прогнозный график потребления электроэнергии

Для реализации концепции тиражирования знаний — последнего этапа работы системы — необходимо [3, с. 74]:

- подобрать способы визуализации и отобразить результаты обработки наиболее удобным способом.
- предоставить возможность работать экспертам с формализованными знаниями как с «черным ящиком», т.е. без необходимости вникать в то, каким образом реализована обработка внутри.

На рис. 2 представлена структурная схема обобщенной оценки объемов потребления электрической энергии.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают высокую надежность и эффективность разработанной методики формирования прогнозных значений электропотребления в металлургии с помощью аппарата нейро-нечетких сетей.

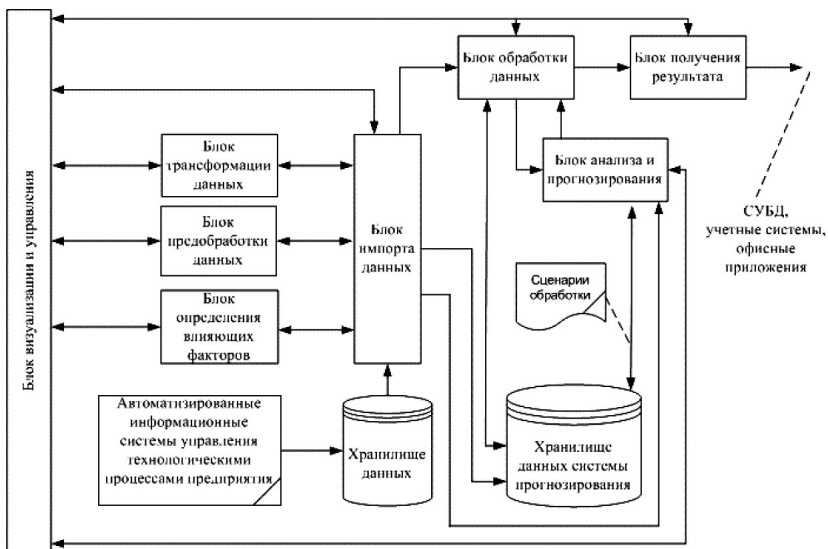


Рисунок 2. Структурная схема обобщенной оценки объемов потребления электрической энергии

Предложенный метод прогнозирования потребления электроэнергии позволяет уменьшить ошибку прогноза до 2÷5 %, улучшая экономические показатели производства в крупном металлургическом центре.

Список литературы:

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики, М.: Юнити, 1998. С. 1005
2. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 496
3. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. М.: Наука. Физматлит, 1996. С. 208
4. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ, М.: Вильямс, 2006. С. 576
5. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление электропотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат, 2003. С. 480.
6. Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.:Металлургия, 1986. С. 239

СЕКЦИЯ 8.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ ПОЛИГИДРОКСИ-1,4-НАФТОХИНОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Савченко Вячеслав Георгиевич

*Специалист лаборатории функциональных пищевых товаров; Центр
исследования качества и безопасности товаров ШЭМ ДВФУ,
г. Владивосток*

E-mail: savslav@yandex.ru

Бабин Юрий Владимирович

д.х.н., МГУПП, г. Москва

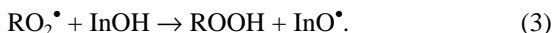
E-mail: buv@list.ru

Антиоксидантные свойства природных полигидрокси-1,4-нафтохинонов (ПГНХ) — хиноидных пигментов морских беспозвоночных, известны достаточно давно. Эхинохром, спинохромы А, С, D и E эффективно тормозят автоокисление жиров и масел [5], термическое окисление алкилбензолов [1]. Выраженные антиоксидантные свойства полигидрокси-1,4-нафтохинонов (ПГНХ) послужили основой для разработки нового лекарственного препарата «гистохром» (эхинохром А) [4], являющегося в настоящее время одним из самых эффективных антиоксидантов нового поколения. Высокая антиоксидантная активность эхинохрома А и родственных полигидрокси-1,4-нафтохинонов обусловлена их способностью играть роль активных перехватчиков свободных радикалов, в частности супероксид-анион-радикала и пероксильных радикалов [3; 10; 11]. При этом ключевую роль в редокс-превращениях ПГНХ играют β -гидроксильные заместители — во 2, 3 и 7 положениях. Замена этих гидроксильных заместителей на метокси-группы сводит антиоксидантную активность ПГНХ к нулю [3].

Превентивная роль антиоксиданта в реакциях окисления, связанных с переносом атома водорода, заключается в прерывании окислительной цепочки

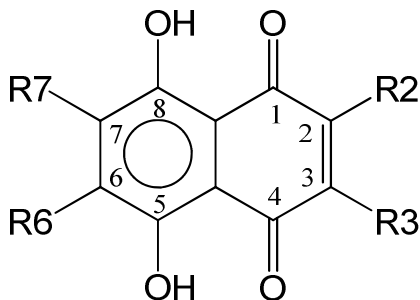


за счет перехвата (ингибирования) свободнорадикальной частицы RO_2^{\bullet}



Слабая O—H связь в InOH делает реакцию 3 термодинамически более предпочтительной, что повышает эффективность InOH как антиоксиданта. Термохимические свойства O—H связей в производных фенола, обладающих антирадикальным действием, изучались различными исследовательскими группами с применением широкого круга теоретических и экспериментальных методов, в результате чего были установлены значения энтальпии диссоциации связи (BDE) OH групп, при которых соединение проявляет заметные антиоксидантные свойства. Специфика ПГНХ заключается в наличии в их фенольной части двух групп гидроксильных заместителей, проявляющих совершенно разные антирадикальные свойства (α - и β -гидроксилы), а также в возможном участии хиноидных β -гидроксильных заместителей в реакциях гашения свободных радикалов.

В данной работе теоретически исследована гомолитическая диссоциация O — H связей β -гидроксильных групп 6-этил-2,3,7-тригидроксиафтазарина (эхинохром А), 2, 3-дигидроксиафтазарина (спиназарин), 2,3,6-тригидроксиафтазарина (спинохром D), 2-дигидроксиафтазарина, 2, 6-дигидроксиафтазарина (рис.1) и исследована молекулярная структура образующихся радикалов. Как известно, для того, чтобы InOH был эффективным антиоксидантом, InO^{\bullet} должен быть стабильным радикалом, относительно медленно вступающим в реакцию с RH, и быстро — с ROO^{\bullet} . Так, константа скорости реакции α -токоферола с пероксильным радикалом составляет приблизительно $10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$, что значительно больше скорости реакции пероксильного радикала с липидами RH [6].



$R_2 = \text{OH}, R_3 = R_6 = R_7 = \text{H}$
 (2-гидроксинафтазарин, **1**)
 $R_2 = R_3 = \text{OH}, R_6 = R_7 = \text{H}$
 (спиназарин, **2**)
 $R_2 = R_6 = \text{OH}, R_3 = R_7 = \text{H}$
 (2, 6-дигидроксинафтазарин, **3**)
 $R_2 = R_3 = R_6 = \text{OH}, R_7 = \text{H}$
 (спинохром D, **4**)
 $R_2 = R_3 = R_7 = \text{OH}, R_6 = \text{C}_2\text{H}_5$
 (эхинохром A, **5**)

Рисунок 1. Полигидрокси-1,4-нафтохиноны (ПГНХ).

Расчеты проводились с использованием гибридного функционала B3LYP с базисом 6-31G(d,p). Анализ результатов расчетов BDE OH-связей ряда фенольных антиоксидантов, приведенных в работах [7–9; 12], показывает, что метод B3LYP/6-31G(d,p) достаточно хорошо воспроизводит значения относительной энтальпии диссоциации, т.е. ее изменение в ряду родственных соединений. Для всех расчетов использовался пакет программ GAUSSIAN09.

Энтальпия реакции отщепления атома водорода (ΔH) представляет собой разность полной энтальпии образования исходной молекулы и радикальных продуктов в реакции



где XOH — нейтральная молекула ПГНХ. При температуре $T=298\text{K}$ энтальпия выражается формулой

$$H(298\text{K}) = E_e + ZPE + H_{vib} + H_{trans} + H_{rot} + RT,$$

где E_e — электронная энергия,

ZPE — энергия нулевых колебаний,

H_{vib} — вклад колебательного движения молекулы,

$H_{trans} = H_{rot} = 3/2RT$ — вклады поступательного и вращательного движений соответственно. Величины ZPE , а также E_{vib} , E_{rot} , E_{trans} вычисляются на основе расчета нормальных колебаний молекулы в пакете программ GAUSSIAN 09.

Электронная энергия атома водорода была принята равной -0.50000 а.е. В расчетах ΔH использовалось значение энтальпии атома водорода при $T=298\text{K}$, включающее в себя E_{trans} и PV , и равное -0.49764 а.е.

Все β -гидроксильные группы ПГНХ образуют слабые водородные связи с соседними атомами кислорода в положениях 1,4,5 и 8. Для того, что бы учесть вклад водородных связей в общее

значение энтальпии реакции 4, была проведена оценка их энергии. С этой целью были оптимизированы структуры конформеров 2, 6-дигидроксиафтазарина (**3**), в которых водородные связи не образуются (рис. 2). Локальные минимумы на ППЭ, соответствующие структурам **3а** и **3б** лежат выше по энергии, чем **3**, на 6.87 и 5.48 ккал/моль соответственно. Полученные значения (ΔH_{BC}) были использованы для корректирования рассчитанных значений энтальпии диссоциации ОН-связей в β -гидроксилах хиноидного и фенольного кольца соответственно.

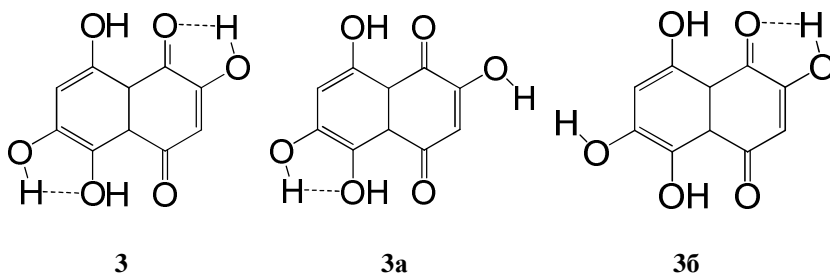


Рисунок 2. Конформации 2, 6-дигидроксиафтазарина (3)

Результаты расчетов BDE β -ОН представлены в таблице 1. Значения BDE представляют собой изменение энтальпии в реакции 4, скорректированное на величину энтальпии разрыва водородной связи: $BDE = \Delta H - \Delta H_{BC}$. Величина BDE ОН заместителей в фенольном кольце ПГНХ меняется незначительно — от 81.24 до 83.42 ккал/моль. Эти значения близки к величине BDE ОН фенола в расчетах V3LYP/6-31G(d,p) — 82.84 ккал/моль. Энтальпия диссоциации β -гидроксильных заместителей хиноидного кольца в значительной степени зависит от их числа — введение ОН заместителя в 3 положение 2-гидроксиафтазарина ведет к понижению BDE на 9.79 ккал/моль.

Понижение величины BDE в соединениях, имеющих пару вицинальных β -гидроксильных, является следствием дополнительной стабилизации образующегося радикала. Значения спиновой плотности на атомах в образующихся радикалах представлены в таблице 2. В соединениях **1** и **3**, имеющих одну хиноидную β -гидроксильную группу, спиновая плотность в значительной степени локализована на атоме углерода С3. Введение ОН группы в положении 3 (соединения **2**, **4** и **5**) приводит к значительной делокализации неспаренного электрона, и, как следствие, к стабилизации радикального продукта.

Таблица 1.

Расчетные значения BDE β-гидроксильных групп ПГНХ

Соединение	ОН группа, подвергаемая разрыву	BDE, ккал/моль
1	R2	86.19
2	R2	76.40
3	R2	87.31
	R6	82.20
4	R2	76.39
	R3	75.58
	R6	81.24
5	R2	75.72
	R3	75.97
	R6	83.42

Таблица 2.

Длины связей C(2) — O(2) в исходных молекулах и радикалах, образующихся при разрыве связи O(2) — H, спиновая плотность в радикалах.

Соединение	Длины связей (Å)		Спиновые плотности на атомах радикала по Малликену		
	C—OH	C—O*	O2	C2	C3
1	1.336	1.234	0.343	-0.156	0.713
2	1.343	1.228	0.285	-0.078	0.458
3	1.333	1.233	0.330	-0.161	0.737
4	1.340	1.225	0.258	-0.080	0.465
5	1.341	1.226	0.263	-0.079	0.464

Найденная зависимость энтальпии диссоциации β-гидроксильных заместителей ПГНХ от их числа и взаимного расположения подтверждает экспериментально установленную связь между строением нафтазариновых производных и их эффективностью как ингибиторов процесса автоокисления различных субстратов — значительной антиоксидантной активностью обладают соединения, как минимум, с двумя β-гидроксильными группами, наибольшую же активность

проявляют те из них, которые имеют пару вицинальных гидроксильных групп. Понижение энтальпии диссоциации ОН-связей при переходе от соединений с одним хиноидным β -гидроксильным группом к соединениям с вицинальными гидроксильными группами составило в наших расчетах примерно 10 ккал/моль. Энтальпия диссоциации вицинальных β -гидроксильных групп в полигидроксилированных-1,4-нафтохинонах на 7 ккал/моль ниже, чем величина BDE ОН-группы в феноле, что сравнимо со значениями BDE ОН-групп фенольных антиоксидантов — величина Δ BDE δ - и γ -токоферолов, активных компонентов витамина Е, составляет -7.3 и -8.9 ккал/моль [9].

Список литературы.

1. Богуславская Л. В., Храпова Н. Г., Максимов О. Б. // Изв. АН СССР. Сер. Хим. 1985, № 7 с. 1471—1476.
2. Лебедев А.В., Богуславская Л.В., Левицкий Д.О., Максимов О.Б. // Биохимия — 1988, 53(4), 598—603.
3. Лебедев А.В., Иванова М.В., Красновид Н.И. и др. Кислотные свойства и взаимодействие с супероксид анион-радикалом эхинохрома А и его структурных аналогов // Вопросы медицинской химии. — 1999. — Т. 45, № 2. — С. 123—130.
4. Левицкий Д.О., Лебедев А.В., Садретдинов С.М., Швилкин А.В., Афонская Н.И., Руда М.Я., Розенштраух Л.В., Флейдервиш И.Я., Максимов О.Б., Мищенко Н.П., Кольцова Е.А., Артюков А.А., Глебко Л.И., Новиков В.Л., Ануфриев В.Ф., Еляков Г.В., Серебрякова Л.И., Цигитшвили О.В., Черпаченко Н.М. (1991) Заявка на изобретение № 4764885/14. Решение ВНИИГПЭ о выдаче патента от 6 дек. 1991 г. Межд. пат. WO 91/07958 № 1833544., М, ВНИИГПЭ.
5. Максимов О.Б., Кольцова Е.А., Уткина Н.К. и др. А. с. № 566870 СССР // Б. И. 1977. № 28.
6. Burton, G.W.; Ingold, K.U. // Acc. Chem. Res. 1986, 19, 194.
7. DiLabio G.A., Pratt D.A., LoFaro A. D., and Wright J. S. // J. Phys.Chem. A 1999, 103, 1653—1661
8. James S. Wright, David J. Carpenter, Daniel J. McKay, and K. U. Ingold. // J. Am. Chem. Soc. 1997, 119, 4245—4252.
9. James S. Wright, Erin R. Johnson, and Gino A. DiLabio. // J. Am. Chem. Soc. 2001, 123, 1173-1183
10. Lebedev A.V., Ivanova M.V., Levitsky D.O. Echinochrome, a naturally occurring iron chelator and free radical scavenger in artificial and natural membrane systems // Life Sci. — 2005. — Vol. 76, № 8. — P. 863—875.
11. Lebedev A.V., Ivanova M.V., Levitsky D.O. Iron chelators and free radical scavengers in naturally occurring polyhydroxylated 1,4-naphthoquinones // Hemoglobin. — 2008. — Vol. 32, №1. — P. 165—179.
12. Wayner, D. D. M.; Luszyk, E.; Page, D.; Ingold, K. U.; Mulder P.; Laarhoven, L. J. J.; Aldrich, H. S. // J. Am. Chem. Soc. 1995, 117, 8737-8744

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ГРОЗНЕНСКОЙ НЕФТИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ НА МАЛОТОННАЖНОЙ УСТАНОВКЕ

Такаева Мадина Атлаевна

старший преподаватель ГГНТУ, г. Грозный

E-mail: karina-lada@mail.ru

Пивоварова Надежда Анатольевна

д. т. н., профессор АГТУ, г. Астрахань

E-mail: nadpivov@love.ru

Обеспечение потребности страны в топливе и энергии — одна из важнейших проблем развития народного хозяйства. Доля добычи нефти и природного газа в структуре производства энергетических ресурсов сокращается. В таких условиях важнейшей задачей развития нефтеперерабатывающей промышленности становится углубление переработки как основной фактор повышения эффективности использования нефти в народном хозяйстве. При увеличении глубины переработки нефти, как показывают расчеты, в 1,2—1,4 раза против современного уровня расход нефти может быть уменьшен на 20—35 %.

Решение подобной задачи возможно путем разработки гибких технологических схем глубокой переработки нефти на основе широкого применения термokatалитических процессов, а также путем оптимизации качества моторных топлив с целью расширения их ресурсов за счет увеличения доли отбора от нефти при прямой перегонке.

Установки подготовки и первичной переработки нефти — головные на нефтеперерабатывающих предприятиях и эффективность их работы во многом определяет технико-экономические показатели заводов в целом.

Наличие в нефти, поступающей на переработку, хлоридов и воды способствует хлористоводородной коррозии оборудования, приводит к длительным простоям технологических установок, сокращает срок службы дорогостоящих катализаторов, используемых во вторичных процессах, ухудшает качество товарных нефтепродуктов. Присутствие пластовой воды в нефти существенно удорожает ее транспортировку по трубопроводам. С увеличением содержания воды в нефти возрастают энергозатраты на ее испарение и конденсацию (в 8 раз больше по сравнению с бензином). Возрастание транспортных расходов обуславливается не только перекачкой балластной воды, но и

увеличением вязкости нефти, образующей с пластовой водой эмульсию.

Механические примеси нефти, адсорбируясь на поверхности глобул воды, способствуют стабилизации нефтяных эмульсий. Образование устойчивых эмульсий приводит к увеличению эксплуатационных затрат на обезвоживание и обессоливание, а также оказывает вредное воздействие на окружающую среду, так как при отделении пластовой воды часть нефти сбрасывается вместе с водой в виде эмульсии, что загрязняет сточные воды. При большом содержании механических примесей усиливается износ труб и образование отложений в аппаратах, что приводит к снижению коэффициента теплопередачи и производительности установок [1, с. 174].

В связи с широким применением вторичных процессов, жестче становятся требования к содержанию хлоридов в нефти, поступающей на переработку. При снижении содержания хлоридов до 5 мг/л из нефти удаляются такие металлы, как железо, кальций и магний; содержание ванадия снижается более чем в 2 раза, что исключительно важно с точки зрения качества реактивных и газотурбинных топлив, нефтяных коксов и других нефтепродуктов. На НПЗ США еще с 1960-х гг. обеспечивается глубокое обессоливание нефти до содержания хлоридов менее 1 мг/л и тем самым достигается бесперебойная работа установок прямой перегонки нефти в течение двух и более лет. На современных отечественных НПЗ считается вполне достаточным обессоливание нефтей до содержания хлоридов 3 — 5 мг/л и воды до 0,1 % (мас.) [1, с. 178].

С внедрением мощных комбинированных установок возрастают требования к надежности работы оборудования и, следовательно, необходимость более глубокой очистки нефти становится весьма актуальной.

По мере истощения запасов нефти и газа проблема углубления переработки нефти, т.е. получение максимального количества топлив масел из каждой тонны перерабатываемой нефти, приобретает все большее значение. Сравнительно быстрый рост обводнения добываемых нефтей даже при правильных системах разработки свидетельствует о старении перерабатываемых месторождений и, как следствие, о снижении уровня нефтедобычи.

Совершенствования современных электрообессоливающих установок направлены на повышение глубины обессоливания нефти и снижение при этом расходных показателей. Поиск решений ведется по нескольким направлениям. В первую очередь это разработка новых нефтеводорастворимых дезэмульгаторов, обеспечивающих при малом

расходе (5 — 10 г/т) высокую эффективность обезвоживания нефти. В настоящее время в мире ведется разработка новейших эффективных деэмульгаторов, таких как "Дау Кемикал" (США), "БАСФ" (Германия), "СЕРВО" (Голландия), "Диссольван" (фирма ХЕХСТ/КЛАРЕАНТ, Германия), "СНПХ" [2; 3], "Алкан"-ДЕ (Россия) [3].

Значительное место в исследованиях, направленных на увеличение глубины процесса обессоливания и обезвоживания, занимает промывка нефти пресной водой. Применение рациональной схемы промывки позволяет снизить расход промывной воды, а значит — и количество сбрасываемой в канализацию воды [4, с. 347].

В последние годы были предложены деэмульгаторы, которые могут быть использованы для глубокого обезвоживания и обессоливания стойких эмульсий высокосмолистых и парафиновых нефтей с одновременной защитой нефтепромышленного оборудования от коррозии [2; 3].

Общим недостатком практически всех известных способов обезвоживания и обессоливания нефти является дороговизна, связанная с применением дорогих деэмульгаторов и большими энергетическими затратами при нагреве нефтяной эмульсии. Кроме того, эти способы ориентированы на применение громоздких дорогостоящих аппаратов, резервуаров и оборудования. В связи с этим все большее применение в нефтяной, газо- и нефтеперерабатывающей промышленности находит магнитная обработка жидкостей для разрушения эмульсий «углеводород-вода». Способ этот является сравнительно простым и экономичным.

При магнитной обработке углеводородных эмульсий в ряде случаев улучшается их расслоение. Скорость расслоения эмульсии и степень их обезвоживания зависит от ряда параметров, среди которых наибольшее влияние оказывает магнитная индукция и скорость потока. Метод магнитной обработки эмульсий можно сочетать с термическим и химическими методами. При комбинировании магнитной обработки с химическим методом магнитной обработке может быть подвергнута как смесь исходной эмульсии с раствором деэмульгатора, так и раствор деэмульгатора с последующим его смешением с эмульсией. Это позволяет в несколько раз увеличить скорость и глубину разделения водонефтяных эмульсий при неизменной концентрации деэмульгатора, либо достигать снижения концентрации деэмульгатора в 2—3 раза без снижения скорости и глубины разрушения эмульсии [5].

Повышение эффективности деэмульгатора обусловлено снижением его критической концентрации мицеллообразования, что проявляется в увеличении оптической плотности его водного и углеводородного растворов в 2—10 раз. Таким образом, предлагаемый способ позволяет в несколько раз увеличить скорость и глубину разделения водонефтяных эмульсий при неизменной концентрации деэмульгатора, либо достигать снижения концентрации деэмульгатора в 2—3 раза без снижения скорости и глубины разрушения эмульсии [2].

Существуют способы воздействия слабым импульсным магнитным полем на эмульсии с целью ускорения процесса отстоя. Недостатком такой обработки эмульсий в магнитном поле является то, что желаемый эффект достигается только при малых сечениях трубопроводов.

Снижение затрат на подготовку нефти можно достичь делением потока жидкости, поступающей на обработку, на равные части, каждую из которых подвергая затем воздействию слабого импульсного магнитного поля и проводя отстой в малогабаритных трубчатых отстойниках. При этом значительно сокращается расход дорогостоящих деэмульгаторов, исключается нагрев эмульсии для ускорения отстоя нефти и воды.

Применение делителя потока на равные части позволяет использовать наиболее эффективно слабое магнитное поле с минимальным расходом электроэнергии. Кроме того, обработка эмульсии магнитными полями сокращает время отстоя нефти и воды в 2—3 раза, применение малогабаритных аппаратов при таком способе уменьшает металлоемкость установки не менее чем в 2 раза.

Одним из наиболее экономичных вариантов магнитной обработки нефтяной эмульсии является обработка сильным импульсным магнитным полем только раствора деэмульгатора, повышая его эффективность и снижая тем самым его удельный расход. Следовательно, электрические поля являются мощным фактором интенсификации процесса деэмульсации нефти при ее подготовке к переработке [6].

В результате проведенных исследований авторами предлагается проводить разделение водонефтяной эмульсии Грозненской нефтесмеси с использованием деэмульгатора — Кемеликс 3307 X, а также с целью экономии пресной воды на блоке ЭЛОУ применить двухступенчатую схему с противоточной подачей промывной воды.

Для повышения эффективности разделения сырой нефти на компоненты, ускорения расслоения эмульсии, а также для снижения

расхода деэмульгатора предлагается сырую нефть перед входом в электродегидратор Э-1 подвергнуть магнитной обработке путем воздействия однополярно направленных постоянных точечных магнитов (патент № 2272128, Россия).

Результаты показали, что глубже всего обессоливание проходит при обработке нефти магнитным полем при магнитной индукции 0,15 Тл, с добавлением деэмульгатора. Остаточное содержание хлористых солей в этом варианте составляет 0,2 мг/л.

Список литературы:

1. Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
2. Интенсификация добычи нефти, увеличение нефтеотдачи пластов, снижение обводненности.// ИНФОИЛ Нефтеодача. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.mos-prom.ru/firms/infoil-nefteotdacha-13920.php> (дата обращения 17.11.2011)
3. Технология повышения нефтеотдачи на базе деэмульгатора СНПХ-4410.//НИИНЕФТЕПРОМХИМ. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.mi.ru/ventblanc.narod.ru/more/katalog1.pdf> (дата обращения 17.11.2011)
4. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа. М.: Химия, 2001. 568 с.: ил.
5. Шайдаков В.В., Каштанова Л.Е., Емельянов А.В. Аппараты для воздействия на водонефтяные эмульсии магнитным полем. //Сборник трудов по науке и технике. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://www.laboratory.ru/> (дата обращения 17.11.2011)
6. Композиция СНПХ-8903 и технология ее применения для интенсификации добычи нефти.// НИИНЕФТЕПРОМХИМ. [электронный ресурс] — Режим доступа. — URL: <http://neftpx.ru/> (дата обращения 17.11.2011)

СЕКЦИЯ 9.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОВЯДИНЫ И МЯСА ЯКА МЕТОДОМ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Озбекова Жылдызай Эрназаровна

аспирант, научный сотрудник КТУ «Манас», г. Бишкек, Кыргызстан

Кулмырзаев Асылбек Атамырзаевич

профессор, д. т.н. КТУ «Манас», г. Бишкек, Кыргызстан

E-mail: ozjildiz@mail.ru

Мясо является наиболее ценным продуктом питания людей в большинство стран мира. Как ценный источник обеспечения организма человека белками и энергией, этот продукт занимает в рационе питания людей важное место [1]. Мясо яка с незапамятных времен употребляется в пищу живущими в горных регионах Центральной и Внутренней Азии и обладает хорошей текстурой, его пищевая ценность обуславливается входящими в его состав богатыми незаменимыми аминокислотами (валин, лейцин, изолейцин, лизин, метионин, треонин, триптофан, фенилаланин) полноценными белками и содержащими незаменимые полунасыщенные жирные кислоты липидами [1; 2; 4]. По сравнению с другими домашними скотами мясо яка считается продуктом богатым на белки [3; 4]. Ряд авторов указывают на малое содержание в этом мясе одного из основных пищевых веществ — жира и считают на том основании его недостаточно жирным, постным продуктом [2; 4]. Природно-климатические и пастбищные условия Кыргызстана благоприятствуют развитию яководства и его экспорту. Если мясо яка планируется производить в промышленных масштабах, то требуется его быстрые и точные исследования [5]. Самым дешевым, быстрым, точным и не портящим продукт и отличающимся высокочувствительностью и селективностью аналитическим методом исследования является флуоресцентная спектроскопия [5; 6]. Известно, что существует

корреляция между флуоресцентными свойствами рибофлавина, триптофана и витамина А с химическими составами мяса и, следовательно, по флуоресцентным спектрам можно предсказать химические составы образцов.

Образцы были взяты из перечисленных мышц, средняя ягодичная мышца *Gluteus medius-GM*, длиннейшая мышца спины *Longissimus dorsi-LD* и полусухожильной мышщ *Semitendinosus muscle-ST* мяса привезенных с Кочкорского района Нарынской области двухгодовалого яка (быка) и коровы (быка). Каждое мясо было разделено на две части для химического анализа и для флуоресцентно-спектрального анализа по отдельности. После идентификации полученные образцы были упакованы герметично в полиэтиленовые пакеты и оставлены при температуре 4°C. Образцы (рис. 1) были нарезаны в размере (3×9=27) для химического анализа и в размере (3×54=162) 3×2 см толщиной в 3-4 мм для спектрального анализа. Были проведены химические анализы образцов мяса и определены массовые доля влажности, белка и жира. Процентный состав влаги было определено с помощью высушивания в лабораторном сушильном шкафу СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И1 (НЕВУ. 681118.015 ПС, Россия) при температуре 105°C в течении 18 часов. Составы жиров были определены путем экстрагирования в аппаратах Сокслет- Extraction Unit EV6 All/16 (Gerhardt, Германия) с применением петролийного эфира(AOAC Official Method 996.36, Fat (Crude) in Meat and Meat Products, Solvent Extraction (Submersion) Method). Общий белковый состав был определен методом Къельдаля (AOAC Official Method 981.10, Crude Protein in Meat and Meat Products, Block Digestion Method) в аппаратах Distillation System Vapodest 20 (Gerhardt No:004444, Германия) для этого были взяты по 2 г образцов. Флуоресцентно-спектральный анализ был проведен с помощью спектрофлуорометра Fluoromax-4 (Jobin Yvon, Франция). В пробах снимали флуоресцентные спектры эмиссии триптофана (диапазон: 305-500, возбуждение: 290 нм) рибофлавина (витамин В2) (диапазон: 410-700, возбуждение: 382 нм) и витамина А (диапазон: 340-540, возбуждение: 322 нм). Измерения проводились при комнатной температуре.

Флуоресцентные спектры, полученные с помощью флуоресцентного спектрометра были нормализованы для вновь переработки. Затем были обработаны многомерными статистическими (хеометрическими) методами как анализ главных компонент (РСА), дискриминационный анализ с помощью регрессии на латентные

структуры (PLSDA) и регрессия с помощью проецирования на латентные структуры (PLSR).

Процедура математического анализа данных была написана в кодах MatLab (The Math Works Inc., США).

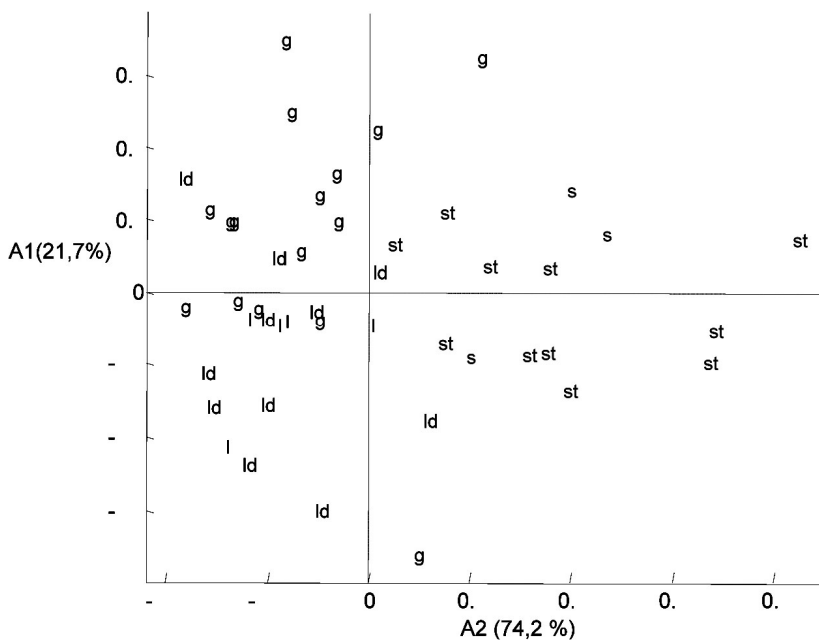


Рисунок 1 Образцы мяса яка и говядины

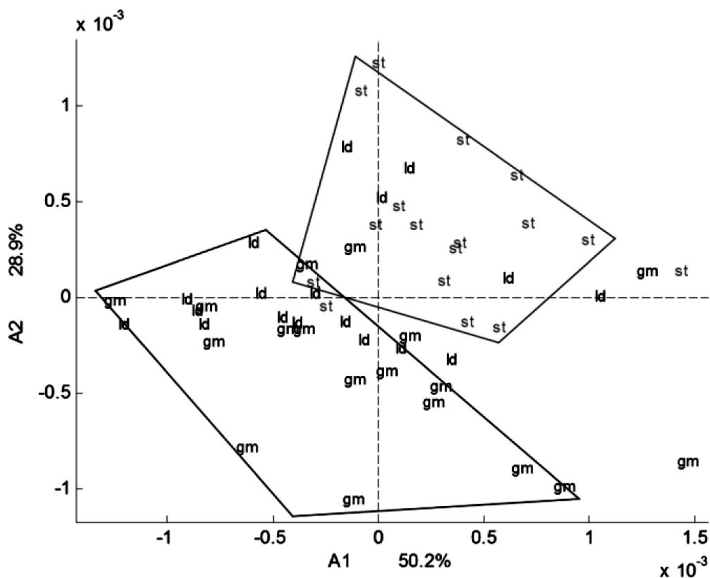


Рисунок 2 Результаты анализа главных компонент (спектров рибофлавина в мясе яка и говядине)

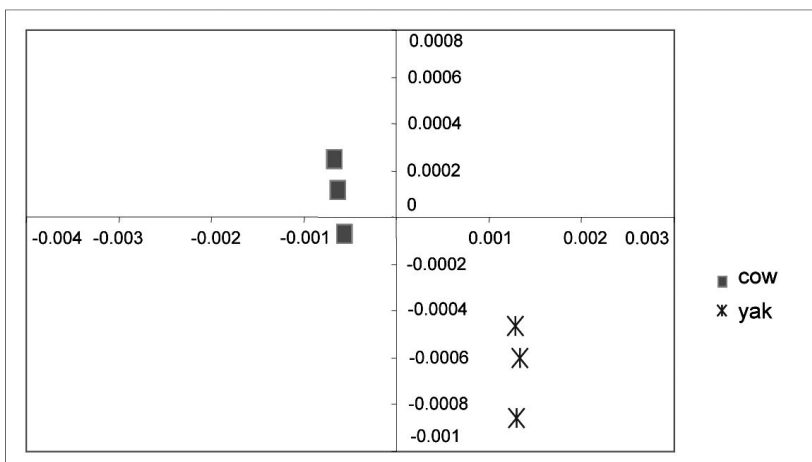


Рисунок 3 Результат анализа главных компонент спектров триптофана в образцах мяса

На рисунке (2) представлены результаты анализа главных компонент (1-я и 2-я компоненты) полученных при обработке спектров эмиссии рибофлавина в говядине и мясе яка. Как видно из рисунка, одноименные мышцы мяса яка и говядины расположены отдельно друг от друга, что позволяет классифицировать мясо по типу мышц. Рисунок (3) показывает, что спектры эмиссии триптофана позволяет классифицировать мясо по типу животных. Такие же результаты получены при обработке спектров эмиссии витамина А. Такие различия в флуоресцентной спектроскопии, триптофана, рибофлавина и витамина А одноименных мышц яка и коровы, что показывает возможность классификации типов мяса с помощью флуоресцентной спектроскопии. Дискриминационный анализ с помощью регрессии на латентные структуры PLSDA позволила распознать отдельные пробы по типу мяса со 100% ной точностью, а по виду животных с точностью до 94,3%. Регрессия с помощью проецирования на латентные структуры (PLSR), примененная по спектральным данным и результатами химического состава образцов, показала, что химические составы образцов мяса предсказывається с точностью ($r^2=0,83$ для влаги, $r^2=0,72$ для белка и $r^2=0,69$ для жира) спектрами эмиссии рибофлавина. Таким образом, результаты исследования показывает, что флуоресцентная спектроскопия может быть использована в качестве инструментом для быстрой и точной характеристики говядины и мяса яка.

Список литературы:

1. Абдыкеримов А. А. Теория и практика разведения яков в Кыргызстане.- Б.: 2001. — 95 с.
2. Абдыкеримов А. А. Биологические и хозяйственные особенности яков Кыргызской Республики. Труды Кирг.СХИ им К.И.Скрябина. 1970, т 3, вып. 16. — С. 28—31.
3. Алымбеков К. А. (2007). Мясо яка. Кыргызский Экономический Университет. Издательство — полтграфический центр «Инсанат», 2007. — 208 с. Бишкек.
4. Алымбеков К. А., Криштафович В.И. Биологическая ценность мяса яков// Мясная индустрия. — 2002. — №10. — С. 36—38.
5. A. A. Kulmyrzaev, R. Karoui and J. De Baerdemaeker, E. Dufour. (2007). Infrared and fluorescence spectroscopic techniques for the determination of nutritional constituents in foods. *International Journal of Food Properties*, 10: 299—320, 2007.
6. A. Sahar, T. Boubellouta, J. Lepetit, É. Dufour. (2009). Front-face fluorescence spectroscopy as a tool to classify seven bovine muscles according to their chemical and rheological characteristics. *Meat Science* 83 (2009) 672—677.

СЕКЦИЯ 10.

ТРАНСПОРТ

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ КАК СВОЙСТВО ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕССА

Буракова Анжелика Васильевна

старший преподаватель РОАТ МИИТ г. Москва

E-mail: avburakova@mail.ru

Отрицательное влияние неравномерность перевозочного процесса при перевозке грузов оказывает не только на качество транспортного обслуживания грузовладельцев, но и на показатели эксплуатационной деятельности железных дорог. Колебания величины интервала поступления поездов на станции переработки приводят к возникновению межоперационных простоев, неравномерной загрузке маневровых средств, к необходимости создания излишних резервов производственной мощности (пропускной и перерабатывающей способности объектов инфраструктуры и парков подвижного состава), привлечению дополнительного эксплуатационного персонала.

Неравномерность перевозочного процесса на железнодорожном транспорте является объективным фактором. Истоки неравномерности зарождаются вне транспортного процесса, поскольку колебания объема перевозок неразрывно связаны с процессами производства, объём и ритмичность предъявления отправки к перевозке также определяются владельцем груза и, поэтому, не могут быть полностью устранены силами только транспортников.

Другая причина неравномерности перевозочной работы создаётся непосредственно спецификой работы железнодорожного транспорта. Железнодорожная перевозка осуществляется, как правило, только когда масса или длина грузового состава достигнут установленной нормы, то есть время завершения накопления является случайной величиной. Кроме того, процессы перемещения грузов и вагонов состоят из последовательности технологических операций, продолжительность выполнения которых также существенно варьируется в различных эксплуатационных условиях.

22 декабря 2010 года на итоговом заседании правления ОАО «РЖД» президент Компании В.И. Якунин в числе приоритетных задач по совершенствованию технологии грузовых перевозок назвал внедрение технологии движения грузовых поездов по расписанию.

Проблема повышения равномерности перевозок на железных дорогах является актуальной, несмотря на то, что она и в нашей стране и за рубежом изучалась практически с момента создания железнодорожного транспорта, что подтверждается глубокими исследованиями, выполненными в диссертации д.т.н. В.И. Бодюла [2].

К одному из первых исследований в области неравномерности железнодорожных перевозок следует отнести работу [4] Ф.К. Галицкого, который еще в XIX веке в работе «Пропускная способность железных дорог и замешательства в движении» отмечал: «Замешательства в движении оказывались тем более трудно устранимыми, что усиление дорог шло не по стройному плану для всей сети, или отдельных направлений, а зависело от случайных комбинаций, перемен направления движения грузов вследствие разности цен в портах и изменения тарифов, или от взглядов стоящих у последнего лиц и т.д.».

В 1920-1948 гг. проблеме влияния неравномерности перевозочного процесса на издержки транспортного хозяйства и поиску путей её снижения были посвящены труды М.В. Земблинова, А.К. Угрюмова, В.А. Соковича, И.И. Васильева и др. В этот период превалировала идеология организации движения поездов по жестким расписаниям и отвергалась позиция о неизбежности колеблемости вагонопотоков и поездопотоков по времени. Если до этого неравномерность считалась серьезной проблемой, то после 1935 года она была объявлена «ширмой для сокрытия плохой работы».

В 1948-1955 гг. основное внимание уделялось обеспечению равномерности работы в течение суток. В эти годы выходят труды коллектива ученых Московского транспортно-экономического института под руководством профессора В.В. Повороженко где утверждается, что «...равномерная работа на протяжении суток является одним из основных резервов ускорения оборота вагона, так как внутрисуточная неравномерность оказывает наибольшее влияние на работу транспорта» и предлагается учет количества выгруженных вагонов производить по четвертям суток.

Причины возникновения неравномерности и показатели для оценки степени неравномерности рассматриваются в статье [5, с. 87] Ф.У. Грушевского, в которой автор делает следующий вывод «...При таком количестве самых разнообразных причин, оказывающих

влияние на равномерность движения, установить влияние каждого фактора на величину колебаний размеров движения весьма затруднительно. Остаётся один путь определить фактические размеры колебаний от воздействия всех факторов вместе взятых и установить пределы этих колебаний. Используя эти неравномерности, можно попытаться определить численные значения потерь, обусловленных неравномерностью перевозок...»

В начале 1963 г. в труде [1, с. 95] Н.Н. Баркова и др. «Сезонная и внутринедельная неравномерность грузовых перевозок на железных дорогах», подробно освещается ряд вопросов, связанных с неравномерностью перевозок: сезонной, помесечной, внутримесячной и внутринедельной. В числе причин, вызывающих суточную неравномерность, автор называет неритмичную работу предприятий, увеличение выпуска продукции к концу месяца, недостатки в планировании, снабжении и сбыте, неравномерность погрузки по назначениям, неравномерность в снабжении порожняком, перерывы в движении для ремонтных работ и т.п. Борьба с этими причинами, успешное их устранение, по его мнению, позволяет вскрывать новые резервы роста перевозок, создает условия для обеспечения выполнения графика движения поездов и норм технологического процесса станций и подъездных путей.

В 70-е-80-е годы в эксплуатационной науке для учета фактора неравномерности стали широко применяться методы теории случайных процессов. Большой вклад внесли ученые МИИТа (Акулиничев В.М., Батулин А.П., Боровой Н.Е., Дьяков Ю.В., Пазойский Ю.О., Сотников И.Б., Тихонова К.К., Шабалин Н.Н.), которые первыми в своих трудах научно обосновали применение этих разделов математики для инженерных расчетов.

Анализ теоретических работ и практического опыта дают основание сделать вывод о том, что проблема снижения неравномерности перевозочного процесса и его ресурсного обеспечения даже при переходе на обращение грузовых поездов на отдельных участках по расписанию еще далека от окончательного разрешения.

В условиях преобладания парка частных грузовых вагонов проблема ресурсного обеспечения перевозочного процесса ещё больше усложнилась. Поэтому можно сделать вывод о актуальности изучения внутрисуточных колебаний перевозок в условиях работы по расписанию на отдельных полигонах и, связанных с этим явлением, вопросов устойчивости эксплуатационной деятельности железных дорог.

Для снижения потребности в подвижном составе и путевом развитии станций, в условиях объективно существующей

неравномерности движения поездов, в концепции, утверждённой ОАО «РЖД», предлагается организация движения грузовых поездов по расписанию. Однако, даже равномерный подход поездов с разных направлений к узловой станции не приводит к автоматическому обеспечению равномерного потока поездов на следующем после узла направлении.

При исследовании процесса равномерного пропуска поездов, поступающих на узловую станцию Д равномерно с направлений А-Д и Б-Д (строго со своими межпоездными интервалами), для формирования алгоритма модели был разработан график равномерного движения поездов. Поезда с направления А и Б следуют только в направлении С. Из анализа графика стало ясно, что, при интервале следования поездов от станции Д в направлении станции С меньше расчетного обязательно происходят потери «ниток» графика. Нарушается строгая равномерность потока поездов, а, при установлении интервала больше расчетного, возникает «бесконечная очередь» из поездов. Сокращая продолжительность интервала следования поездов от станции Д в направлении станции С можно уменьшить продолжительность простоя поездов в ожидании.

Несколько иначе выглядит процесс движения поездов в обратном направлении, когда поезда равномерно подходят к узловой станции Д с одного направления С-Д, а дальше расходятся по разным направлениям Д-А и Д-Б (строго со своими межпоездными интервалами). Анализ графика движения поездов показывает, что в начале на направление Д-А отправлен поезд без задержки, а далее, из-за отсутствия готового поезда на станции Д, «пропадает» нитка графика на направлении Д-Б. В данном примере принят допуск, что прибывший поезд с направления С-Д, отправляется на первый же освободившийся участок (Д-А или Д-Б).

В реальных условиях прибывающий на узловую станцию поезд имеет точное назначение по направлению следования, что вызывает дополнительную потребность в путевом развитии станции для стоянки поезда в ожидании нитки графика нужного направления. Отклонения от строгого выполнения расписания прибытия поездов на станцию может вызвать увеличение как количества приемо-отправочных путей, так и продолжительности простоя поездов.

Для полной оценки потребного путевого развития узловой станции и средней продолжительности простоя грузовых поездов на ней, исходя из требования обеспечить на выходе с неё заданного равномерного поездопотока во все направления, процесс движения поездов в различных сочетаниях средних интервалов поступления

поездов с разных направлений на узловую станцию и соответственно интервалов выхода поездов с неё необходимо промоделировать.

Однако даже из анализа приведенных примеров можно сделать выводы: график движения поездов после узловой станции всегда должен иметь больше ниток для грузового движения, чем их суммарно поступает на станцию в этом направлении; в реальных эксплуатационных условиях невозможно обеспечить строго равномерное движение поездов после узловой станции, всегда должен создаваться «допустимый интервал отклонения»; наибольшая потребность в путевом развитии узловой станции возникает при повышении использования пропускной способности и увеличивается в направлении «распыления» поездопотока, если поезда имеют четкую специализацию.

Четкая система планирования эксплуатационной работы с применением современных методов прогнозирования и управления, и даже переход к обращению грузовых поездов по расписанию, могут служить основой для повышения равномерности процессов, но не позволят полностью исключить неравномерность перевозочного процесса, так как любая борьба с неравномерностью — это борьба с уровнем неравномерности.

Список литературы:

1. Барков Н.Н. и др. Сезонная и внутринедельная неравномерность грузовых перевозок на железных дорогах. Труды ВНИИЖТ. Вып. 249. — М.: Трансжелдориздат, 1963. — 95 с.
2. Бодюль В.И. Повышение ритмичности и эффективности транспортного производства на основе снижения внутрисуточной неравномерности грузовых перевозок на железных. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва. — 2006. — 318 с.
3. Бородин А.Ф. Эксплуатационная работа железнодорожных направлений. (Труды ВНИИАС, вып.6) — М.,ВНИИАС, 2008. — 320 с.
4. Галицкий Ф.А. Пропускная способность железных дорог и замешательства в движении. СПб. 1890. — 249 с.
5. Грушевский Ф.У. Методика определения влияния неравномерности перевозок на количественные и качественные показатели работы. Труды ВНИИЖТ. Вып. 25. — М.: Трансжелдориздат, 1961. — 87 с.
6. Шаров В.А. Технологическое обеспечение перевозок грузов железнодорожным транспортом в условиях рыночной экономики. М.: Интекст, 2001. — 198 с.

СЕКЦИЯ 11.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖИДКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЙ ТИПА «КОРУНД» СОВМЕСТНО С РАЗЛИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Жуков Артем Николаевич

аспирант ВолГАСУ, г. Волгоград

E-mail: ya.elektronka2011@yandex.ru

В настоящее время на российском рынке строительных материалов появляется огромное количество новых жидких сверхтонких теплоизоляционных материалов. Жидкий теплоизолятор представляет собой суспензию на основе структурированных акриловых полимеров. Наполнителем и теплоизолирующей составляющей в них являются мельчайшие стеклянные и керамические капсулы, внутри которых находится вакуум (или инертный газ).

Одним из наиболее распространенных материалов данного типа является теплоизоляция серии «Корунд». Жидкие керамические теплоизоляционные покрытия этой серии состоят из высококачественного акрилового связующего, оригинальной разработанной композиции катализаторов и фиксаторов, керамических сверхтонкостенных микросфер с разряженным воздухом. Корунд, представляя собой многокомпонентную смесь, характеризуется прежде всего природой и видом полимерного связующего. И особое значение имеет выбор водорастворимого полимера, что позволяет не использовать токсичные растворители, что в свою очередь повышает экологичность и пожаробезопасность покрытия. Наиболее перспективным является полимерные связующие на основе синтетических латексов. Помимо основного состава в материал вводятся специальные добавки, которые исключают появление коррозии на поверхности металла и образование грибка в условиях повышенной влажности на бетонных поверхностях. Эта комбинация делает материал легким, гибким, растяжимым, обладающим отличной адгезией к покрываемым поверхностям. Материал по консистенции напоминающий обычную краску, является суспензией белого цвета, которую можно наносить на любую

поверхность. После высыхания образуется эластичное полимерное покрытие, которое обладает уникальными по сравнению с традиционными изоляторами теплоизоляционными свойствами и обеспечивает антикоррозийную защиту [2, с. 9].

Для исследования данного теплоизоляционного покрытия были проведены лабораторные испытания.

Эксперимент состоял из двух частей:

1. часть — нанесение материала Корунд на горячую металлическую пластину, с температурой $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, (для этого использовалась специальная лабораторная плитка с возможностью точного регулирования температуры нагрева) и проведение замера температуры различными приборами (различными по методу измерения и принципу действия) на поверхности теплоизоляционного покрытия Корунд [1, с.6].

2. часть — нанесение на Корунд различных материалов — такие как акриловая краска, силиконовая краска, акриловый клей, бумага, флизелиновые обои (на универсальном клее), шпатлевка, гофрокартон, керамическая плитка, металл, пенопласт толщиной 1 мм. Далее при одинаковом температурном режиме (на плитке температура $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$) измерение температуры на поверхности данных материалов, нанесенных на покрытие Корунд [1, с.8].

В первой части эксперимента на металлическую пластину толщиной 3 мм было нанесено теплоизоляционное покрытие Корунд толщиной 1 мм. Размер пластины 300x400 мм. Нанесение теплоизоляционного покрытия производилось кистью слоями по 0,3 мм с межслойной сушкой 24 часа. В качестве приборов для измерения температуры поверхности использовались следующие сертифицированные электронные измерители:

3. Измеритель температуры Elcometer 319;
4. Термощуп Термо-5;
5. Контактный термометр ТК-04.5;
6. Пирометр;
7. ИТП МГ-4 «Поток».

Полученные результаты измерений сведены в таблицу 1.

На основании данного опыта можно сделать вывод, что различные приборы в зависимости от их принципа действия (контактные, бесконтактные и т. д.) имеют различные показания температуры именно на поверхности теплоизоляционного покрытия Корунд.

Таблица 1.

Результаты измерения температуры поверхности образца

Прибор	Температура на поверхности теплоизолированного участка, °С	Температура на поверхности неизолированного участка, °С
Контактный термометр ТК-04.5	75,4	100
Термошуп Термо-5	52,5	98
Elcometer 319	44,7	-
Пирометр	73,6	97
ИТП МГ-4 «Поток»	65,9	100

Это объясняется тем, что материал Корунд работает по принципу низкой теплоотдачи с поверхности, а не как стандартные утеплители — путем слабого пропускания тепла. И это только подтверждает, что теплоотдача с поверхности сильно зависит от того, с каким материалом соприкасается данная поверхность. Из данного эксперимента можно сделать вывод, что материалы с высоким тепловосприятием (особенно такие материалы, как металл) радикально увеличивают теплоотдачу с поверхности покрытия Корунд. И фактически контактные приборы (с обычной термопарой), имея металлический наконечник, показывают температуру с учетом сильного нагрева металла на поверхности теплоизоляционного слоя Корунд.

Во второй части эксперимента на теплоизоляционное покрытие Корунд были нанесены различные покрытия: металл, акриловая краска, силиконовая краска, акриловый клей, бумага, флизелиновые обои (на универсальном клее), шпатлевка, гофрокартон, керамическая плитка, пенопласт толщиной 1мм.

Результаты измерений представлены в таблице 2.

Данный эксперимент наглядно показывает, что температура на поверхности различных материалов, нанесенных поверх материала Корунд изменяется в зависимости от свойств нанесенного материала. Кроме того, данный опыт подтверждает принцип действия теплоизолирующего покрытия Корунд — низкая теплоотдача с поверхности, которая в свою очередь в большой степени зависит от того, с каким материалом соприкасается поверхность Корунд.

Таблица 2.

Результаты измерений температуры различных материалов на поверхности образца

Материал	Температура на поверхности, °С
Теплоизоляционное покрытие Корунд®	47,3
Акриловая краска	49,4
Акриловый клей	57
Металл	62,1
Бумага	48
Картон	48,4
Флизелиновые обои	45
Штукатурка на цементно-песчаном растворе	54
Шпатлевка	53,6
Керамическая плитка	59,6
Пенопласт (толщиной 1мм)	47
Гофрокартон (толщ. 4 мм, с воздушной прослойкой)	46

Из таблицы 2 видно, что теплоотдача в металл максимальная и металлические предметы, соприкасающиеся с поверхностью покрытия Корунд, нагреваются до температуры близкой к той температуре, которая находится под покрытием Корунд. В то же время теплоотдача, к примеру, в акриловую краску на водной основе или флизелиновые обои практически не изменяется.

Это говорит о том, что покрытие Корунд корректно использовать в качестве финишного покрытия. В случае технологической или декоративной необходимости наносить поверх покрытия Корунд различных материалов необходимо учитывать их теплофизические показатели.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что большинство контактных приборов для измерения температуры имеет металлический датчик, который обладает повышенным тепловосприятием и теплоотдача в него возрастает, что объясняет причину получения ошибочных результатов температуры на поверхности ЖКТ Корунд при помощи контактных термометров и

термопар (с металлическими измерительными наконечниками). Металлические датчики обладая повышенным тепловосприятием нагреваются до температуры в 1,5-2,5 раза выше, чем реальная температура поверхности Корунд, что приводит к некорректным результатам на дисплее прибора.

Это ключевой момент, который необходимо учитывать при выборе средств измерения для проведения испытаний. Основываясь на данных, полученных в ходе испытания в последствие для контроля тепловых характеристик на поверхности теплоизоляционного покрытия «Корунд» рекомендовано использовать приборы по типу Elcometer 319.

Список литературы:

1. Исследование тепловых характеристик сверхтонкой теплоизоляции Корунд, технический отчет, Волгоград 2011.
2. Метод постановки опыта и расчета коэффициента теплопроводности для сверхтонких тепловых изоляционных материалов, методические рекомендации по теплотехническим расчетам М-001-2003, Москва 2009.

УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ОБОЙМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИБРОБЕТОНА

Поднебесов Павел Геннадьевич

аспирант ТГУ, г.Тольятти
E-mail: gaudiarch@yandex.ru

Каюмова Зилья Минияровна

ст.преподаватель ТГУ, г.Тольятти
E-mail: tsp@iltsu.ru

В период эксплуатации внецентренно сжатые железобетонные колонны испытывают на себе влияние различных факторов: химических, механических и термических. Особенную опасность представляет увеличение эксплуатационных нагрузок (увеличение грузоподъемности кранов в промышленных зданиях, смена конструкции покрытия). При этом нагрузка на несущие конструкции существенно возрастает (в особенности на опорные части железобетонных колонн), что может привести к потере несущей способности. К перечню причин, вызывающих необходимость усиления, следует отнести следующие:

- коррозия арматуры, как следствие отслаивание защитного слоя бетона, а также уменьшение сечения на 25-30%;
- увеличение нагрузок на несущие конструкции;
- появление дефектов, вызванных динамическим воздействием на конструкции;
- ошибки при проектировании, изготовлении и монтаже.

Следует отметить, что решение о целесообразности усиления конструкций (в особенности опорных частей колонн), должно приниматься в каждом конкретном случае, с учетом эксплуатационных требований и состояния несущих элементов. Из опыта проектирования и реконструкции зданий известно, что обоймы являются одними из самых простых и надежных конструктивных решений усиления и применяются достаточно часто [1; 2; 4].

Одним из наиболее важных факторов, определяющих сопротивление сжатых усиленных железобетонных конструкций является «эффект обоймы», то есть способность обойм сдерживать поперечные деформации усиливаемого элемента. Поперечное армирование обойм приводит к увеличению деформативности, по этой проблеме известны исследования. С появлением новых компози-

ционных материалов (фибробетон) исследований «эффекта обоймы» и новых конструктивных решений обойм в настоящее время недостаточно. В нормативной литературе [6] существуют зависимости и формулы для проектирования фибробетонных конструкций, однако, отсутствуют нормы проектирования усиления с использованием дисперсно армированного бетона (сталефибробетона).

В настоящее время значительно увеличивается объем реконструкции промышленных, а также общественных зданий. Поэтому возникает необходимость в разработке новых конструктивных решений усиления несущих элементов, в особенности опорных частей сжатых железобетонных колонн.

В связи со сложившейся проблемой на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» под руководством к.т.н., доцента В.В.Теряника разработаны конструктивные решения усиления опорных частей колонн. В качестве связующего между элементом и конструкцией усиления был выбран композиционный материал — фибробетон.

Сталефибробетоном (или фибробетоном) называют бетон, дисперсно армированный расположенными в нем стальными волокнами — фибрами (диаметр составляет 0,2-1,0 мм, длина волновой фибры 12-20 мм, высота гофры 2,0-2,5 мм, длина — 8,0-10,0 мм). Каждая фибра играет роль стержневой арматуры в железобетоне. По своим свойствам фибробетон значительно отличается от привычного бетона. Прочность фибробетона на растяжение при изгибе возрастает в 2-3 раза, трещиностойкость — в 1,5 — 2 раза по сравнению с бетоном. Существенно возрастает износостойкость и морозостойкость. За счет улучшения приведенных выше свойств долговечность фибробетонных конструкций возрастает в 2-3 раза по сравнению с железобетонными.

Преимущества технологии изготовления фибробетонных конструкций:

- значительная экономичность данной технологии;
- во время созревания бетона не происходит трещинообразования;
- ударопрочность фибробетона (вязкость разрушения) значительно превосходит ударопрочность привычного бетона;

Первое конструктивное решение [3] состоит из бетона, армированного стальным волокном — фиброй (6). Опорная часть колонны армируется каркасом из продольной (7) и поперечной (8) арматуры. Технический результат полезной модели достигается тем, что элемент изготавливается в виде двух U-образных металлических лотков (2), которые соединяются между собой при помощи фланцев

(4), которые стягиваются болтами(5), что позволяет уменьшить сварочные работы и дает возможность многократного использования опалубки при выполнении усиления (усиление производится не на всю длину колонны, а только на участок, имеющий непосредственное повреждение). Дополнительное армирование позволяет существенно увеличить несущую способность колонны и придать ей дополнительную жесткость (рис.1).

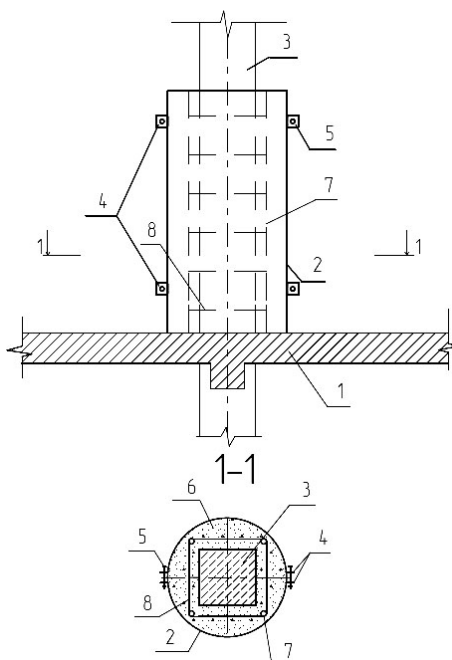


Рисунок 1. Усиление арматурным каркасом

Первое конструктивное решение имеет недостаток — достаточно низкое сопротивление скольжению арматуры в бетоне. Технической задачей настоящего конструктивного решения является создание наружной усиливающей конструкции, которая позволит устранить вышеупомянутый недостаток известной усиливающей конструкции, и наиболее важным техническим решением, которой является обеспечение возможности создания лучшего сцепления и соединения между усиливающей конструкцией и колонной, подлежащей усилению. Усиление производится не на всю длину колонны, а только на участок, имеющий непосредственное повреждение.

Устранение недостатка: На концы стержней арматурного каркаса привариваются стальные шайбы (9), что обеспечивает дополнительную анкеровку арматуры в бетоне (рис.2). Полученное соединение хорошо сопротивляется выдергиванию и существенно уменьшает скольжение арматуры в бетоне. Поврежденную железобетонную колонну (3) заключают внутрь стальной обоймы (2). Герметично соединяют две половины овального сечения в единое целое при помощи фланцев (4), которые стягиваются между собой болтами (5), и плотно заполняют полости между стальной обоймой (2) и поврежденной железобетонной колонной (3), фибробетоном (6).

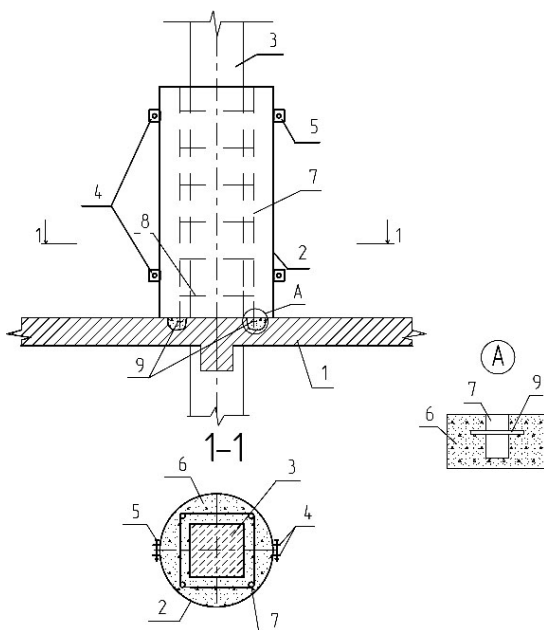


Рисунок 2. Усиление арматурным каркасом с применением анкеровки

Однако некоторые из существующих конструктивных решений обладают недостатком: недостаточная несущая способность сжатых железобетонных элементов. Данный недостаток устраняется путем создания наружной усиливающей конструкции, которая состоит из металлической обоймы съёмной U-образной конфигурации, половинки которой соединены друг с другом в единое целое фланцами, стянутые между собой болтами, промежутки между усиливаемой конструкцией

и опалубкой заполняются фибробетоном и позволяет устранить вышеупомянутый недостаток путем установки сварного арматурного каркаса из продольной арматуры и поперечной арматуры в виде спиральной обмотки, расстояние между ветвями спирали должен быть не менее 40 мм, но не более 1/5 диаметра сечения элемента и не более 100 мм [5].

На чертеже (рис.3) представлены общий вид и разрез 1-1 поврежденной железобетонной колонны (1), усиленной стальной, съёмной U образной обоймой (2), половинки которой соединены друг с другом в единое целое фланцами (3), стянутые между собой болтами (4). Опорная часть колонны армируется сварным каркасом из продольной (5) и поперечной (6) арматуры в виде спиральной обмотки. Полости между стальной обоймой и поврежденной железобетонной колонной заполняют фибробетоном (7).

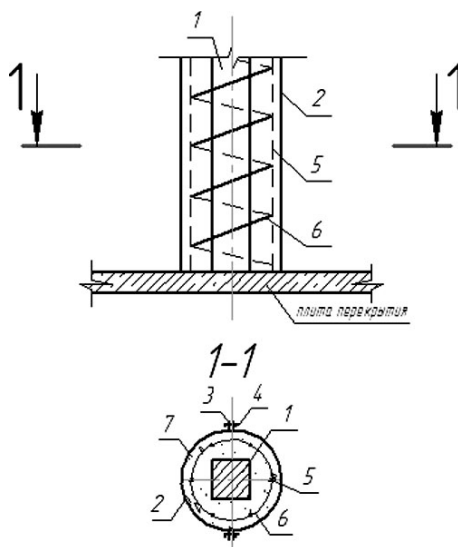


Рисунок 3. Усиление обоймой с арматурным каркасом, выполненным в виде спиральной обмотки.

В соответствии с техническим решением наружная усиливающая конструкция с применением армирования имеет следующие существенные отличия:

- несущая способность усиливаемого элемента (колонны) при осевом и внецентренном сжатии увеличивается, что объясняется

работой фибробетона и сварного арматурного каркаса из продольной арматуры и поперечной арматуры в виде спиральной обмотки.

Таким образом, усиление обоймами с использованием фибробетона, является эффективным способом повышения несущей способности железобетонных колонн.

Список литературы:

1. Гроздов В.Т. Усиление строительных конструкций / В.Т. Гроздов. — СПб.: ВИТУ, 1997. — 264 с.;
2. Поднебесов П.Г. Новые способы усиления сжатых элементов железобетонных конструкций / П.Г. Поднебесов, В.В. Теряник // Вестник РУДН. М., 2010. № 2. — С. 36—39;
3. Поднебесов П.Г. Патент 106278 Российской Федерации, E04G23/00. Наружная усиливающая конструкция колонны / П.Г. Поднебесов, В.В.Теряник. — № 2010153624; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.07.2011. — Бюл. № 19. — 2 с.;
4. Теряник В.В. Усиление сжатых железобетонных колонн обоймами / В.В.Теряник, А.О. Борисов // Жилищное строительство, 2010. — № 2. — С. 24—25;
5. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции: / НИИЖБ Госстроя СССР. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. — 80 с.;
6. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции: / Госстрой России. — М.: ФГУП «НИЦ «Строительство» Росстроя, 2006. — 110 с.

«НАУКА И ТЕХНИКА XXI ВЕКА»

Материалы международной заочной научно-практической
конференции

14 ноября 2011 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 21.11.11. Формат бумаги 60x84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 9,25. Тираж 550 экз.

Издательство «Априори»
630099, г. Новосибирск, ул. Романова, 28
E-mail: info@a-ti.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Априори»
630099, г. Новосибирск, ул. Романова, 28