**РОССИЯ МОЛОДАЯ:
ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ –
В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

Выходит один номер в год
№ 1, 2019

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
А. В. Косых,
ректор ОмГТУ

Редакционная коллегия:
Е. А. Андреева, доктор технических наук
А. В. Бубнов, доктор технических наук
И. А. Кировская, доктор химических наук
А. Г. Козлов, доктор технических наук
А. П. Моргунов, доктор технических наук
В. И. Трушляков, доктор технических наук
А. Г. Янишевская, доктор технических наук

Ответственный секретарь
О. И. Бабенко, начальник ИПО ОмГТУ

Язык публикаций
русский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания в систему
Российского индекса научного цитирования:
705-11/2013 от 20.11.2013

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=41264

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. 206
Контактный телефон:
8 (3812) 65-35-36
e-mail: fap_omsk@omgtu.ru
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2019

Подписано в печать 29.05.2019.
Формат 60×84 1/8. Усл. печ. л. 14,50.
Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе
в типографии ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Тираж 500 экз. Заказ .

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

Ю. Е. Жданова, А. А. Федоров, А. И. Блесман, Д. А. Полонянкин
Исследование поверхности образцов из титанового сплава ВТ3-1, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки……5

Д. С. Реченко
Исследование условий работы лезвия при финишной обработке труднообрабатываемых материалов……11

М. Ю. Солнышков
Технологичность отливок при литье в вакуумно-пленочные формы……17

А. В. Тигнибидин, С. Х. Хужамуратов
Исследование точности методики измерения на координатно-измерительной машине с помощью эталонного кольца……20

Энергетика, электротехнические комплексы и системы, энергоэффективность, энергосбережение, энергоаудит

В. В. Аникин, В. З. Ковалев, В. О. Бессонов, Р. Н. Хамитов
Исследование асинхронных электродвигателей в составе электротехнического комплекса добычи нефти……..24

В. В. Аникин
Установка для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей……28

П. В. Беляев, А. П. Головский
Повреждения обмоток статора асинхронных двигателей и их диагностика……..33

А. Я. Бигун, Е. П. Жиленко, Е. В. Петрова, Л. В. Владимиров, А. Е. Обвинцев, В. Н. Мазко
Отечественные устройства контроля параметров воздушных линий электроэнергетических систем……..37

А. А. Бубенчиков, Т. В. Бубенчикова, Н. А. Терещенко, Г. Ю. Киселев, Е. А. Манакова, В. И. Беляев , М. А. Голованов
Перспективные пути развития генераторов для ветроэнергетических систем……41

А. А. Бубенчиков, Н. А. Терещенко, Т. В. Бубенчикова
Обзор накопителей кинетической энергии маховикового типа……53

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов
Моделирование обобщенной компьютерной модели электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости 59

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов, В. И. Шпинева
Электропривод с фазовой синхронизацией с организацией отработки изменения сигнала задания в режиме замкнутого управления 65

А. С. Емельянов, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов
Жаротрубный котёл 69

А. М. Калашников, И. Д. Обухов
Исследование тепловой эффективности исследованных ранее видов теплоизоляции в упрощенной проточной части теплообменного аппарата и полноценной модели рекуперативного теплообменника 72

Б. Ю. Киселёв, Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер
Сравнение способов устранения краевого эффекта при дискретном вейвлет-анализе сигналов тока 76

Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселев, В. Н. Горюнов, Е. П. Жиленко
Применение пакетного вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции изменяющегося во времени сигнала тока распределительной сети 80

А. Г. Михайлов, В. С. Виниченко, И. П. Пышный, А. Е. Иванова, Е. Н. Слободина
Экспериментальное определение теплофизических свойств теплоносителей с примесями 89

Д. В. Рысев, П. В. Рысев
Исследование влияния уровня продольной компенсации на возникновение и развитие подсинхронного резонанса 93

А. В. Симаков, О. А. Лысенко, М. Ю. Чернев
Моделирование устройств релейной защиты и автоматики в программном обеспечении DigSILENT PowerFactory 98

И. А. Степашкин, А. Г. Михайлов
Особенности использования твердого топлива в котельных установках 102

А. А. Татевосян, А. С. Татевосян, В. Е. Аникин, Б. В. Чижма, Г. О. Белявский
Разработка математической модели электроимпульсного устройства очистки технологических поверхностей от сыпучих материалов 105

Р. Н. Хамитов, В. В. Аникин
Методика идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием характеристики затухания тока статора 109

Приборостроение, телекоммуникации. Электроника и радиотехника

Д. С. Баранов, С. С. Колмогорова, А. С. Колмогорова, С. В. Бирюков
Возможность учета корректирующего коэффициента условий эксплуатации датчиков электромагнитных полей 114

А. Л. Ворожцов
Развитие отечественной технологии производства электронных компонентов СВЧ-диапазона 117

В. В. Ерохин, К. В. Мурасов, С. А. Завьялов
Активный перестраиваемый полосовой фильтр в интегральном исполнении 120

С. А. Завьялов, В. Ю. Шеин, Р. Р. Фахрутдинов
Проектирование малошумящей целочисленной системы ФАПЧ..... 127

В. А. Захаренко, Я. Р. Веприкова, Д. В. Кузнецов
Исследование постоянной времени пирометра ПД-10 133

И. В. Иванов, А. Г. Козлов
Моделирование температурной зависимости подвижности дырок в карбиде кремния 136

В. Е. Леонов
Применение твёрдых растворов алмазоподобных полупроводников в качестве материалов
для компонентов «электронного носа» 143

К. О. Николайчук, А. В. Щелканов
Методика проверки кварцевых генераторов в серийном производстве..... 151

П. И. Пузырёв, М. А. Квачев, В. А. Ерохин
Самоорганизующаяся сеть низкоскоростных радиосистем передачи коротких сообщений
средневолнового диапазона 156

Материалы и технологии. Нанотехнологии и наноматериалы. Физико-химические системы, механизмы и устройства

Е. О. Алтынкович, К. С. Плехова, О. В. Потапенко, Т. П. Сорокина, В. П. Доронин
Модифицирование цеолита ZSM-5 щелочами и соединениями фосфора для изменения
его активности в реакциях переноса водорода при крекинге спиртов 161

А. П. Солоненко, А. И. Блесман, Д. А. Полонянкин
Нанокомпозиты на основе плохоокристаллизованного апатита, гидросиликата кальция и кальцита,
полученные осаждением в водных растворах 165

Транспортные и космические системы

А. А. Нахлесткин, И. П Аистов, К. А. Вансович
Прогнозирование развития дефектов потери металла на магистральных трубопроводах
на основании математической модели, реализуемой в программе ANSYS..... 170

С. Ю. Онищук
Анализ бестопливных средств очистки околоземного космического пространства 174

В. И. Трушляков, И. Ю. Лесняк, В. А. Севоян
Разработка технологии проведения экспериментов по моделированию процесса испарения
ракетного топлива..... 180

Информационные технологии в производстве

Е. А. Андреева, Я. А. Галустьян
Оценка эффективности требований к системе защиты информации 184

Ж. В. Голикова, А. Г. Янишевская
Методы интеграции данных систем предприятий 188

А. С. Кафизов, Н. О. Раков, А. В. Гаак, Д. А. Тюньков, А. С. Грицай
Разработка структуры базы данных приборов и их показаний теплоэнергогенерирующего предприятия 191

Т. В. Кривальцевич, А. Г. Янишевская
Моделирование механизмов формирования неликвидов 194

Е. Ф. Кустов, А. А. Магазев
Оптимизация состава средств защиты информации методом последовательного анализа вариантов 197

А. А. Магазев, А. А. Касенов
Об оценке среднего времени жизни информационной системы, подвергающейся угрозам информационной безопасности 202

Д. С. Мальгавко
Система автоматизации планирования загрузки группы станков с ЧПУ 208

Т. М. Мясоедова
Построение обводов второго порядка гладкости из дуг кривых 2-го порядка 212

Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов
Метод сокращения времени вычисления вектора обобщенных скоростей при моделировании движения руки андроидного робота 215

С. В. Такаюк, А. В. Тигнибидин, Е. Б. Чарушина
Оценка точности инструментального микроскопа Uhl VMM 150 219

А. А. Томилов, Л. А. Денисова
Алгоритм поворота изображения государственного регистрационного знака автомобиля для решения задачи его распознавания 223

В. В. Щетинина
Проектирование адаптера для настройки бортовой аппаратуры 228

УДК 621.9.048.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ3-1, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Ю. Е. Жданова, А. А. Федоров, А. И. Блесман, Д. А. Полонянкин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье представлены результаты исследования образцов из титанового сплава ВТ3-1, изготовленных на проволочно-вырезном электроэрозионном станке SODICK VZ300L. В ходе эксперимента установлены режимы, обеспечивающие стабильную обработку титанового сплава ВТ3-1, при которой вероятность обрыва проволоки минимальна. Методами растровой электронной микроскопии и профилометрии проведено исследование морфологии и шероховатости поверхности образцов, обработанных ПЭЭО.**

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, титановый сплав, шероховатость, морфология поверхности, трещина.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-5-10

I. ВВЕДЕНИЕ

Титан и титановые сплавы получили широкое распространение в различных отраслях промышленности благодаря высоким физико-механическим свойствам: коррозионной стойкости, прочности и сопротивлению усталости. Уникальным свойством титана по сравнению с другими металлами является самое высокое отношение прочности к весу.

Титан и его сплавы нашли применение в следующих отраслях промышленности: биомедицина [1], автомобилестроение, приборостроение, пищевая промышленность и многие другие, а так же при изготовлении спортивного оборудования [6, 9]. Титановые сплавы являются одним из основных материалов в авиационно-космической промышленности и успешно конкурируют с никелевыми сплавами благодаря сравнительно низкой плотности [5].Например, титановый сплав Ti-5Al-2Sn, подвергнутый высокотемпературному отжигу, используется в авиации благодаря высокой вязкости и пластичности при низких температурах [7]. Уже достаточно давно титан применяется для создания биосовместимых имплантатов и медицинского оборудования[3, 8]. По отношению к живому организму титан является биологически инертным материалом, обладающим антикоррозионной стойкостью и высокими механическими свойствами. Исследование влияния добавок Nb, Ta и Zr на свойства титановых сплавов (в частности, токсичность),позволило установить оптимальные концентрации названных легирующих элементов при изготовлении изделий медицинского назначения [2]. Низкие ферромагнитные свойства титана обеспечивают возможность использования физиотерапии при лечении больных с различными титановыми конструкциями в организме, что обусловливает актуальность и перспективы применения титана в медицинской сфере.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Титан является пластичным металлом, который поддается всем видам механической обработки: шлифованию, сверлению, фрезерованию и точению. Наряду с традиционными методами, для обработки титана используют и электроэрозионное оборудование. Однако производители электроэрозионного оборудования предоставляют режимы резания для самых распространенных материалов (таких как: сталь, медь, алюминий, карбид вольфрама), а для титана предустановленные базы данных в стандартной комплектации станков отсутствуют, поэтому необходимо подбирать режимы экспериментальным методом. Помимо стабильности обработки следует выделить такие существенные технологические показателей, как производительность и качество обработанной поверхности. Исследование шероховатости и морфологии поверхности титановых сплавов при их электроэрозионной обработке является основной целью данной статьи.

III. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изготовление образцов из титанового сплава ВТ3–1 проводилась на проволочно-вырезном электроэрозионном станке SODICK VZ300L с использованием дистиллированной воды в качестве диэлектрика и мягкой латунной проволоки (Cu 65%, Zn 35%)диаметром 0,2 мм в качестве электрода-инструмента. Обработка произ-

водилась в 1, 2, 3 и 4 прохода. После обработки на каждом образце были исследованы морфология и шероховатость поверхности. Содержание основных элементов в марке сплава ВТ3–1: Ti–85,95–91,05%; Al–5,5–7%; Mo–2–3%;Cr–0,8–2%; Fe–0,2–0,7%; Si–0,15–0,4%; C–до 0,1%; N – до 0,05% прочих 0,3%. Подобранные экспериментальным методом параметры обработки представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ3–1

	On	Off	Ucp	Icp	H
1 проход	007	015	54	4,2	0,206
2 проход	002	011	68	1,4	0,131
3 проход	001	001	70	0,6	0,111
4 проход	001	001	41	0,4	0,105

где: On –импульс; Off – пауза между импульсами; U –напряжение; I –сила тока; H – офсет;

Сила тока и напряжение были установлены с помощью числового программного управления станка и контролировались встроенным вольтметром и амперметром.

Исследование морфологии образцов проводилось на растровом электронном микроскопе *JEOL JCM-5700*. Тип сигнала – вторичные электроны (*SEI*). Параметр *SpotSize* (размер пятна) – 50, величина ускоряющего напряжения 20 кВ, увеличение от 1500 до 15000 крат. Профилометрию проводили на приборе TR–220 (TimeGroup) на базовых длинах 0,8 и 0,25 мм.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из рис. 1, морфология поверхности образцов титанового сплава после обработки характерна для применения ПЭЭО к другим металлическим материалам.

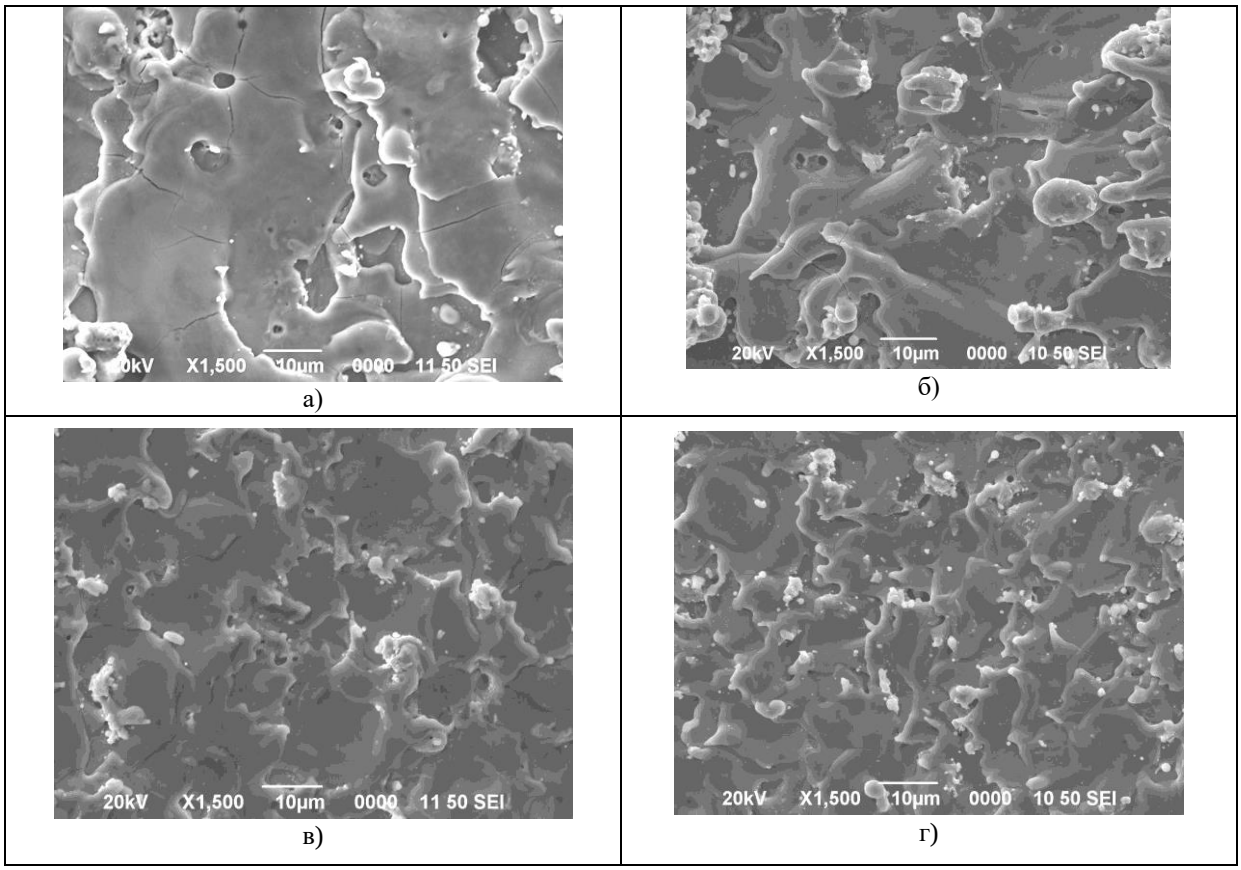


Рис. 1. Поверхность образцов из титанового сплава ВТ3-1 после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,× 1500: а) 1 проход, б) 2 прохода, в) 3 прохода, г) 4 прохода

Границы многочисленных кратеров представляют собой возвышения. Это можно объяснить выплескиванием металла и формированием кратеров с наплывами на краях. Помимо этого на микрофотографиях поверхности образцов после обработки присутствуют кристаллизовавшиеся частицы шлама. После второго прохода количество участков с сравнительно низкой шероховатостью увеличивается, но на поверхности все равно присутствуют частицы шлама. Вместе с этим, по сравнению с первым проходом, происходит уменьшение числа больших впадин и возвышенностей. После третьего прохода наблюдаются значительные улучшения качества поверхности, которая становится более однородной. В некоторых частях образца всё же присутствует небольшое количество налипшего шлама. После четвертого прохода достигается наилучшее качество поверхности (на данном оборудовании), однако время обработки значительно увеличивается.

Авторы работы [11] утверждают, что в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения, микротрещины, которые вносят существенный вклад в преждевременный выход детали из строя при вводе ее в эксплуатацию.

Микротрещины становятся заметными уже при увеличении 1500 крат, но для более детального их исследования использовалось увеличение 15000 крат. (рис. 2).

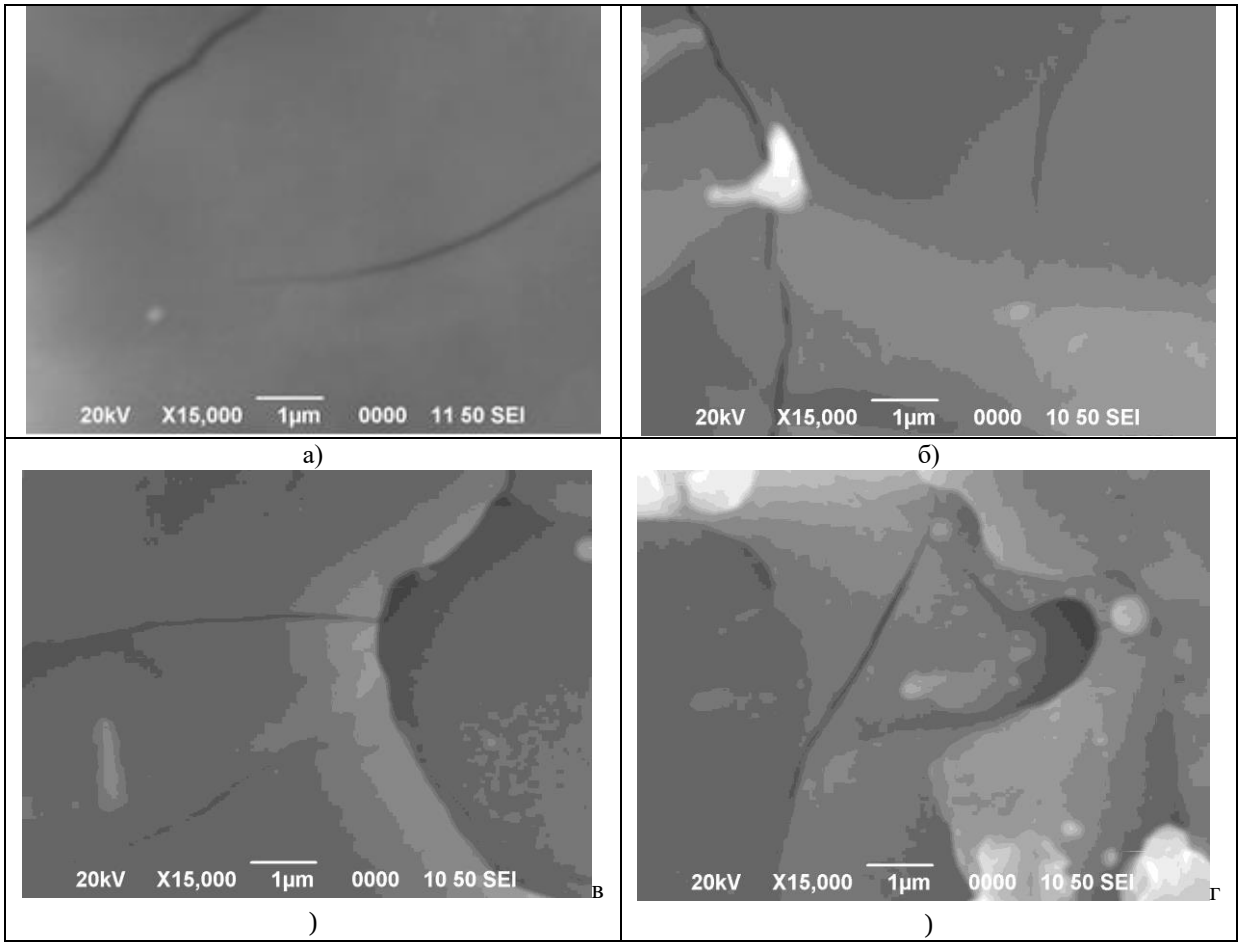


Рис. 2. Поверхность образцов из титанового сплава ВТ3-1 после проволочно-вырезной электроэрозионной обработки,×15000: а) 1 проход, б) 2 прохода, в) 3 прохода, г) 4 прохода

Для первого и второго прохода режимы обработки выше, и ширина трещин достигает 0,2 мкм. После третьего и четвертого прохода трещины становятся менее заметными, а их ширина составляет не более 0,07 мкм. Образование трещин происходит из-за мгновенного нагрева поверхности заготовки свыше 5000° и быстрого охлаждения до температуры диэлектрической жидкости, вследствие чего возникают термические напряжения и последующее растрескивание поверхностного слоя металла. Трещины представлены хаотически выстроенной сеткой. Как уже было показано авторами работы [11], изделие с таким качеством поверхности быстрее выйдет из строя, поэтому необходимо снизить толщину измененного слоя. Решить данную проблему можно с помощью финишных методов обработки, таких как шлифовка, полировка и электрохимическая обработка.

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывают режимы электроэрозионной обработки (табл. 1) и количество проходов. Изучая профилограммы (рис. 3) и табл. 2, можно заметить, что с увеличением

количества проходов, шероховатость уменьшается. Для 1-го прохода – Ra= 2,708 мкм, для 2-го прохода – Ra= 2,003 мкм. После 3-го прохода шероховатость снизилась, а её величина равна 0,685 мкм. После четвертого прохода, величина шероховатости равна 0,446 мкм. Стоит обратить внимание на то, что для сталей, входящих в базу данных станка, эти значения равны: для 1-го прохода - Ra 2,5 мкм, для 2-го прохода - Ra 1,25 мкм, для 3-го прохода - Ra 0,63 мкм, для 4-го прохода - Ra 0,41 мкм. Наряду со снижением шероховатости увеличение количества проходов приводит к уменьшению размеров трещин.

Расчетными и экспериментальными методами давно установлено, что электрические разряды оказывают влияние на целостность поверхности проводника (заготовки). Например, в работе [11] сообщается об увеличении шероховатости поверхности при ПЭЭОпо мере роста длительности импульса тока, пикового тока разряда и энергии разряда. Шероховатость зависит и от материала электрода–инструмента. В нашем исследовании использовалась латунная проволока. Однако известны работы [2], в которых проводится сравнительное исследование морфологии обрабатываемой поверхности и ее шероховатости при использовании латунной проволоки с цинковым покрытием и высокоскоростной латунной проволоки. Установлено, что более низкая шероховатость поверхности обеспечивается посредством использования латунной проволоки с цинковым покрытием. Таким образом, можно предположить, что размер и расположение трещин зависит от типа используемой для резки проволоки. Для этого необходимы дополнительные исследования.

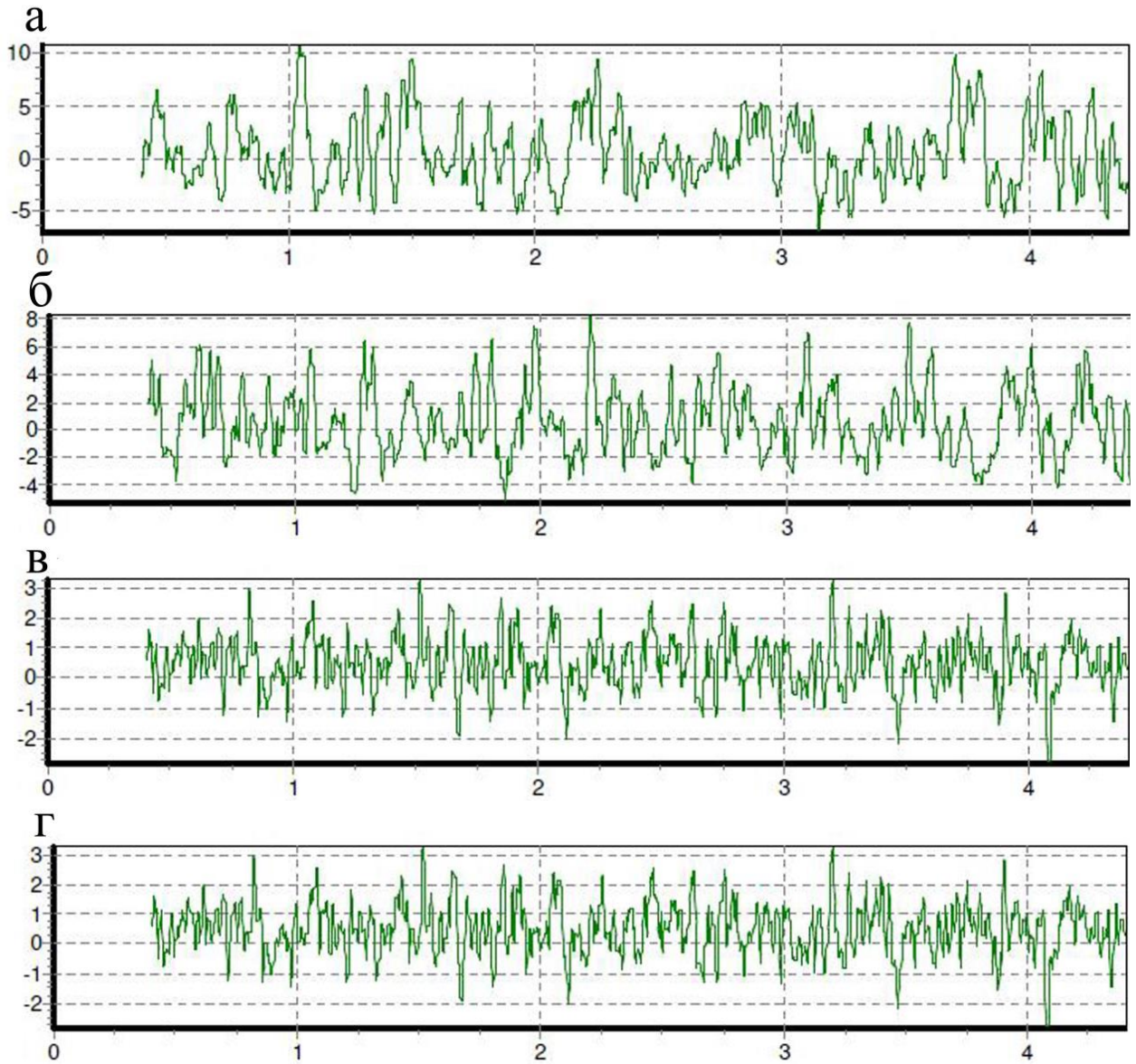


Рис. 3. Профилограммы титанового сплава ВТ3-1 после проволочной электроэрозионной обработки: а) после первого прохода, б) после второго прохода, в) после третьего прохода, г) после четвертого прохода

ТАБЛИЦА 2
ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ3–1

	1 проход	2 проход	3 проход	4 проход
Ra, мкм	2,708	2,003	0,685	0,446

На рис. 4 представлен график оценки микрорельефа по функциональному назначению (износостойкость, герметичность)

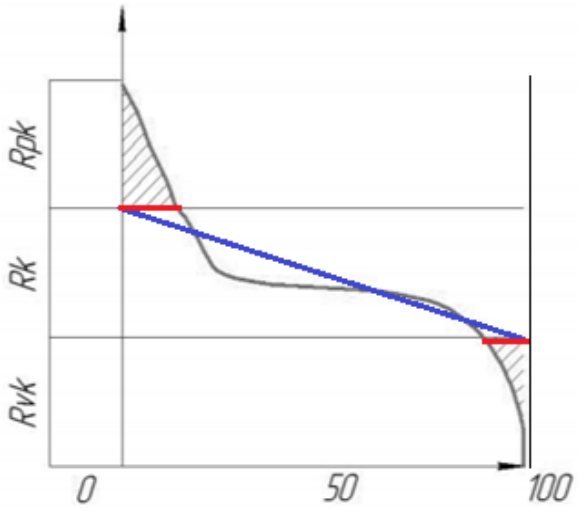


Рис. 4. Оценка микрорельефа по функциональному назначению

где: Rpk – усредненная высота выступов, это верхняя часть поверхности, которая подвергается повышенному износу, в ходе эксплуатации, Rk – средняя глубина микронеровностей, это один из параметров шероховатости основной рабочей поверхности, которая определяет срок работы и производительность изделия в узлах трения, Rvk – усредненная глубина профиля, этот показатель характеризует маслоудерживающую способность канавок на поверхности детали. Для сравнительного анализа графики, полученные для образцов после каждого из 4 проходов, представлены на рис. 5.

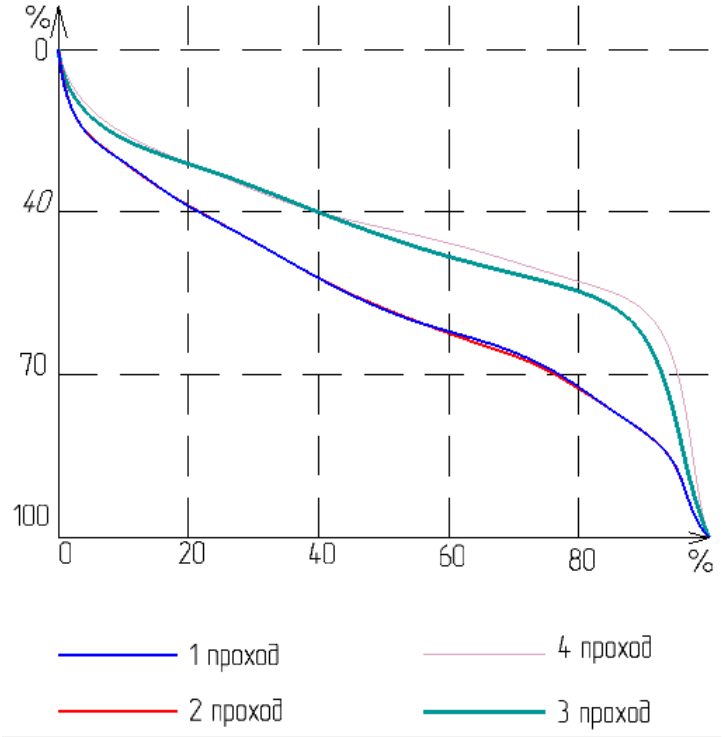


Рис. 5. Графики оценки микрорельефа титанового сплава ВТ3-1 по функциональному назначению

Для анализа параметров Rpk, Rk, Rvk для каждого из графиков проводили линию, усредняющую все его значения, и из точек пересечения с границами оценочного поля проецировали на график горизонтальную линию. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что функциональные свойства деталей, обработанных в 1 и 2 прохода, будут близки, при этом изделие, изготовленное в 1 проход, будет обладать более высокой маслоудерживающей способностью. Процесс приработки деталей, обработанных в 4 прохода пройдет быстрее чем деталей, обработанных в 3 прохода, однако маслоудерживающая способность поверхности, обработанной в 4 проход, снижается.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что без экспериментального подбора режимов обработки изготовление деталей из металлов, не входящих в базу данных проволочно-вырезных электроэрозионных станков, является затруднительным.

Шероховатость поверхности титанового сплава ВТ3-1 после каждого прохода была близка к значениям шероховатости, получаемым при обработке сталей. Однако на втором проходе была замечена разница между рассчитанной шероховатостью для стали и фактической шероховатостью образца, что требует дальнейших исследований. Морфология поверхности образцов титанового сплава ВТ3-1 характерна для применения ПЭЭО к другим металлическим материалам, что подтверждается наличием кратеров, сформированных единичными импульсами, а так же трещин, образованных в результате действия внутренних напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu J. [et al.]. Improved bioactivity of selective laser melting titanium: Surface modification with micro-nano-textured hierarchical topography and bone regeneration performance evaluation // Materials Science and Engineering: C. 2016. 68. P. 229–240. Doi.org/10.1016/j.msec.2016.05.096.

2. Niinomi M. Recent research and development in titanium alloys for biomedical applications and healthcare goods // Science and Technology of Advanced Materials. 2003. P. 445–454. Doi.org/10.1016/j.stam.2003.09.002.

3. Nourbakhsh F. [et al.]. Wire electro–discharge machining of titanium alloy // Procedia CIRP. 2013. 5. P. 13–18.doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.003.

4. Santos, R. F. [et al.]. Analysis of the surface integrity when nitriding AISI 4140 steel by the sink electrical discharge machining (EDM) // Procedia CIRP. 2016. 45. P. 303–306. Doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.197.

5. Albrecht J. Comparing fatigue behavior of titanium and nickel–based alloys // Materials Science and Engineering: A. 1999. 263 (2). P. 176–186. Doi.org/10.1016/S0921–5093(98)01176–9.

6. Patnaik A. K. [et al.]. Understanding the mechanical response of built–up welded beams made from commercially pure titanium and a titanium alloy // Materials Science and Engineering: A. 2014. P. 390–400. Doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.041.

7. Boyer R. R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry // Materials Science and Engineering: A. 1996. 213 (1–2). P. 103–114. Doi.org/10.1016/0921–5093(96)10233–1.

8. Cui C. [et al.]. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development // Materials & Design. 2011. 32 (3). P. 1684–1691. Doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011.

9. Hanson B. H. Present and future uses of titanium in engineering // Materials & Design. 1986. 7 (6). P. 301–307. Doi.org/10.1016/0261–3069(86)90099–3.

10. Honnorat Y. Issues and breakthrough in the manufacture of turboengine titanium parts // Materials Science and Engineering: A. 1996. 213(1–2). P. 115–123. Doi.org/10.1016/0921–5093(96)10229–X.

11. Newton T. R. [et al.]. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. //Materials Science and Engineering. A. 2009. 513–514 (C). P. 208–215. Doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.061.

УДК 921.92

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЛЕЗВИЯ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. С. Реченко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Приведены теоретические основы резания лезвийным инструментом при финишной обработке труднообрабатываемых материалов исходя из остроты твердосплавного инструмента и условий формирования стружки.**

Ключевые слова: качество, металлорежущий инструмент, режущий клин.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-11-17

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптимальные геометрические параметры режущей части инструмента имеют важное значение для обеспечения требуемой производительности механической обработки деталей резанием, периода стойкости инструмента, снижения шероховатости обработанной поверхности и обеспечения высокого качества в целом. Оптимальные величины заднего и переднего углов в основном определяются толщиной среза обрабатываемых материалов:

$$\gamma_{опт} = \frac{C_1}{\sigma_в}, \tag{1}$$

$$\alpha_{опт} = \arcsin\frac{C_2}{a_{\max}^k}, \tag{2}$$

где C_1, C_2, k – коэффициенты и показатель степени, зависящие от свойств обрабатываемого материала и материала инструмента; $\sigma_в$ – предел прочности обрабатываемого материала, кГс/мм^2; a_{max} – максимальна толщина срезаемого слоя, мм.

Данные формулы (1) справедливы при отсутствии радиуса округления лезвия и при допущении, что срезается значительная толщина стружки. Если же толщина стружки соизмерима с радиусом округления, то данные зависимости не актуальны, так как в этом случае резание происходит режущей кромкой частично с отрицательным передним углом, что вносит существенное изменение как в процесс резания, так и в образование поверхностного слоя. Уменьшается и действительный задний угол из-за упругого восстановления подминаемого слоя округленной режущей кромкой. Исходя из условий резания, задача сводится к определению требуемой остроты лезвия инструмента.

II. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При срезании тонких слоев округленной режущей кромкой [1] получается фактически отрицательный передний угол, величина которого возрастает с уменьшением толщины срезаемого слоя при постоянном радиусе округления. Фактический передний угол в точке x можно определить (рис. 1):

$$\gamma_x = \arcsin\frac{R - a_x}{R}, \tag{3}$$

а, фактический угол резания в этой точке:

$$\delta_x = \frac{\pi}{2} + \arcsin\frac{R - a_x}{R}. \tag{4}$$

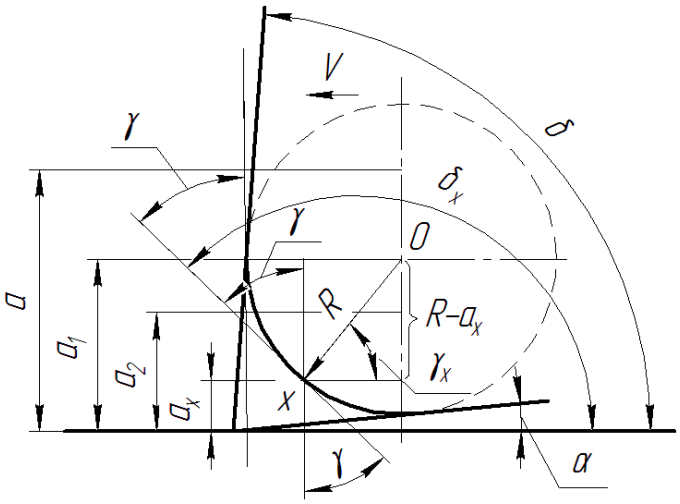


Рис. 1. Схема резания режущим клином

При толщине стружки, равной радиусу округления режущей кромки, расчет действительного угла резания производится по формулам (3) и (4). Если толщина стружки больше радиуса округления, срезаемый слой претерпевает различную деформацию в нижней и в верхней частях. Схема срезания такого слоя, когда толщина стружки примерно равняется двум радиусам округления режущей кромки, показана на рис. 2.

Вследствие отрицательного переднего угла деформация в этой части срезаемого слоя значительно больше, чем в части, где передний угол режущего клина инструмента не изменяется и остается положительным. При этом часть срезаемого слоя срезается, а часть сминается, а после прохождения режущего клина восстанавливается. Поэтому общая толщина a_1 срезаемого слоя будет меньше на величину n сминаемого слоя.

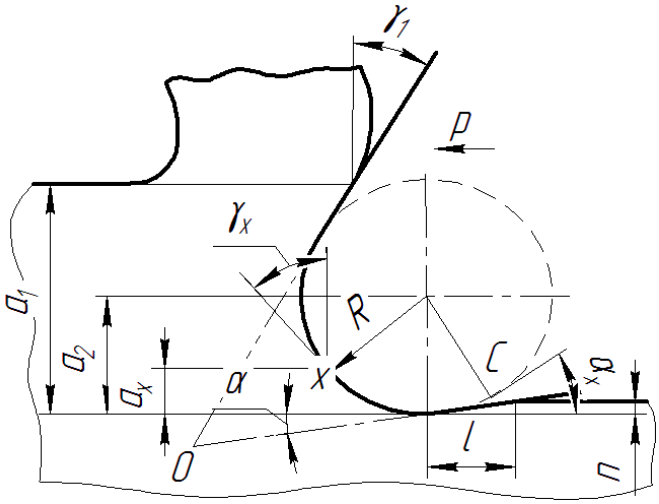


Рис. 2. Схема изменения переднего и заднего углов при резании инструментом с округлением

Сминаемый слой восстанавливается на длине l и набегает на заднюю поверхность режущего клина, в результате чего на этом участке фактически отсутствует задний угол, что приводит к усиленному давлению, налипанию обрабатываемого материала на этом участке и значительному повышению трения. В связи с этим формулу (2) можно записать так:

$$\alpha_x = 90^o - \arcsin\left(1 - \frac{n}{\rho}\right).$$

Образование микронеровностей на обработанной поверхности связано главным образом с пластическими деформациями, упругие же деформации незначительно влияют на высоту остаточных микронеровностей. Основной причиной увеличения шероховатости обработанной поверхности является образование нароста в

определенном диапазоне скоростей резания. Кроме этого, некоторые элементы геометрической формы рабочей части инструмента и режимы резания могут оказывать влияние на микрогеометрию поверхности [2]. Для обеспечения необходимой шероховатости поверхности рекомендуется выбирать оптимальные передние углы, так как при малых и больших (более 25°) передних углах увеличивается шероховатость поверхности.

Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя (увеличение глубины и степени наклепа) приводит к снижению эксплуатационных характеристик деталей, работающих при повышенных температурах. Это относится в первую очередь к деталям, изготовленным из труднообрабатываемых материалов.

Стабильность шероховатости поверхности, минимальное отклонение характеристик поверхностного слоя от исходного металла, отсутствие задиров на поверхности могут быть обеспечены только максимально острым лезвием и при длительном сохранении режущих свойств инструмента, что связано с характером и скоростью изнашивания. Интенсивность износа определяется совокупностью механических и физико-химических явлений.

Различные участки режущего клина подвержены различному износу. На участке 2–3 основным видом износа является адгезионный, представляющий собой периодическое охватывание и последующий отрыв мельчайших частиц обрабатываемого материала и материала инструмента (рис. 3). На остальных участках контакта 1-2 и 3-4 основной вид износа – абразивный, являющийся результатом трения двух поверхностей и микроцарапин от абразивного действия оторвавшихся частиц материала. Действие этих частиц усиливается при обработке жаропрочных и титановых сплавов, так как при образовании стружки выкрашиваются частицы интерметаллических и карбидных включений, имеющих высокую твердость. Можно предположить, что более интенсивный износ режущего инструмента по сравнению с износом при обработке конструкционных материалов объясняется абразивным действием этих частиц на соприкасающуюся поверхность инструмента.

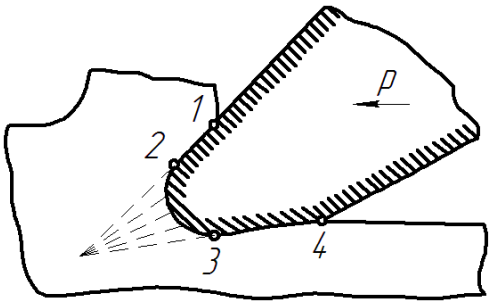


Рис. 3. Схема изнашивания режущей кромки

Рассмотрим процесс стружкообразования (рис. 4). Режущая кромка инструмента при внедрении в обрабатываемый материал вызывает напряжения сжатия, превышающие предел прочности на сжатие $\sigma_в$; на режущей кромке возникают также напряжения сжатия:

$$\sigma_{\max} = k\sigma_{cp} = k\frac{P_z}{F},$$

где k – коэффициент концентрации напряжений; $\sigma_{cp} = P_z/F$ – среднее напряжение; P_z – сила резания; F – площадь режущей кромки.

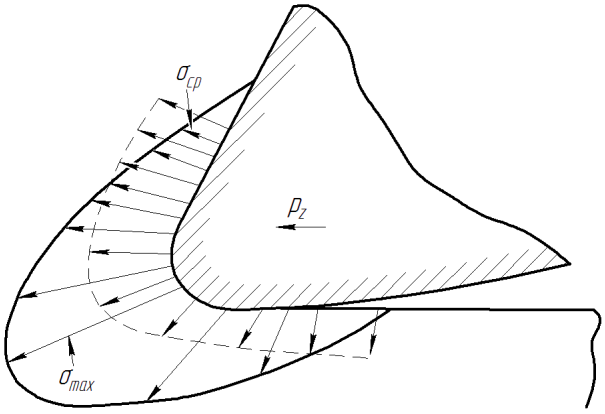


Рис. 4. Схема концентрации напряжений на режущей кромки

Площадь F режущей кромки зависит от радиуса округления и длины режущей кромки $b_{кр}$. Общая площадь соприкосновения с обрабатываемым материалом

$$F = b_{кр} l_{кр},$$

где $b_{кр}$ – ширина режущей кромки, мм; $l_{кр}$ – длина режущей кромки, мм.

Длина режущей кромки складывается из длин, контактирующих по передней и задней поверхностей и радиусу округления лезвия. Очевидно, что при меньшем радиусе округления ρ площадь внедряемой поверхности будет меньше, а напряжение сжатия в обрабатываемом материале больше. Это, в свою очередь, вызывает большую концентрацию напряжений на режущей кромке. Поэтому правильное сочетание радиуса округления лезвия и толщины стружки может обеспечить максимальную стойкость инструмента, при этом для обеспечения минимальной площади контакта необходимо применение максимально острого инструмента.

III. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптимальные параметры режущей части инструмента для обработки труднообрабатываемых материалов

Длительная стойкость инструмента обеспечивается уменьшением радиуса округления лезвия при затачивании, так как данный радиус можно рассматривать как износ в начальный момент времени. Так же к повышению стойкости инструмента ведет уменьшение сопротивления удару при врезании и замедление роста износа по задней поверхности или радиуса округления в целом в процессе резания. От этих факторов зависит выбор оптимальных геометрических параметров режущей кромки металлорежущего инструмента.

При врезании режущей кромки в обрабатываемый материал увеличиваются силы резания, при этом пиковые значения сил резания достигают именно при врезании. В результате возникают внутренние напряжения в режущем клине, и они тем больше, чем больше пиковые значения сил резания. Распределение напряжений зависит не только от максимальных значений сил резания, но и от формы режущей кромки. Отсюда следует, что для снижения напряжений в режущем клине и как следствие износа необходимо применять оптимальную форму режущего клина и повышать его прочность.

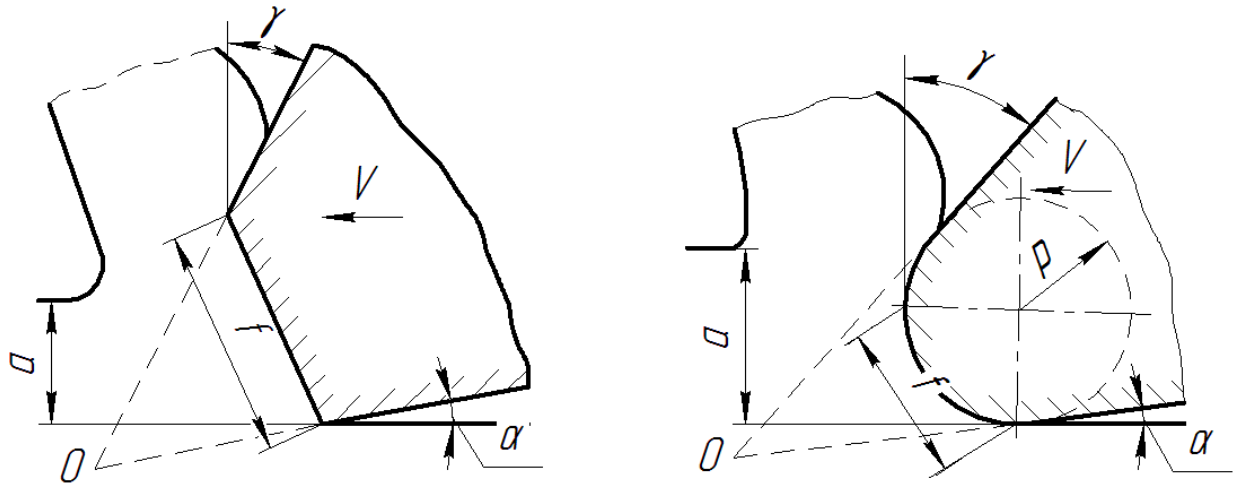
Напряженно-деформационное состояние режущего клина при врезании и установившемся процессе резания зависит от режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и формы режущей части. В связи с этим наиболее управляемыми параметрами являются режимы резания и форма режущей части, так как физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала определены заранее технологическим процессом и фирмой-производителем металлорежущего инструмента.

Эффективным способом повышения стойкости инструмента за счет повышения его прочности является разработка рациональной геометрии, в частности применения микрофаски на передней поверхности режущей части. Исследования показали, что при рациональной ширине и угле отрицательной фаски лезвие значительно меньше выкрашивается и повышается стойкость инструмента.

Поскольку финишная обработка производится при небольших толщинах среза, необходимо, чтобы область округления являлась геометрическим продолжением передней поверхности режущего клина инструмента и как бы имитировала фаску. Для такой естественной формы режущего клина важно выбрать рациональные толщины стружки, при которых контакт с ней режущей кромки приходился бы на поверхность округления, имеющую отрицательный угол, и переднюю поверхность с положительным углом. Тогда поверхность округления используется как естественное усиление режущей кромки инструмента против нагрузки, что повышает стойкость инструмента.

Взаимодействие стружки с режущей кромкой имеющей фаску и радиус округления, показан на рис. 5. Влияние фаски на режущей кромке металлорежущего инструмента (рис. 5*а*) и радиуса округления (рис. 5*б*) аналогично, при условии выбора соответствующих толщин среза. В обоих случаях наблюдается благоприятное распределение напряжений на режущей кромке.

Наиболее изнашивающейся поверхностью режущей кромки является задняя поверхность. Уменьшение интенсивности изнашивания можно достигнуть изменением ее геометрии. Если проанализировать характер протекания износа в зависимости от времени работы, можно заметить появление первых признаков износа на вершине резцов или на уголках фрез. По мере дальнейшей работы износ распространяется вдоль всей рабочей режущей кромки. В связи с этим задний угол и другие параметры, влияющие на износ, должны выбираться такими, чтобы уменьшить износ по задней поверхности.



а) *б*)

Рис. 5. Взаимодействие стружки с режущей кромкой, имеющей фаску (*а*) и радиус округления (*б*)

На некоторых инструментах (протяжки, долбяки и т.д.) для замедления износа задней поверхности применяют ленточку шириной не более 0,1 мм на задней поверхности вдоль режущей кромки. Но применение подобной фаски на металлорежущем инструменте, предназначенном для финишной обработке не возможно, так как это приведет к повышению радиальной составляющей силы резания и значительно снизит его режущую способность.

Передняя и задняя поверхности должны быть высокого качества (менее *Ra* = 0,1 мкм), что уменьшает налипание обрабатываемого материала на эти поверхности. Стандартными методами абразивной обработки можно получить шероховатость *Ra* = 0,63-0,32 мкм (АС4 50/40 – 63/50), доводкой - *Ra* = 0,32-0,16 мкм (АС4 28/20 – 40/28).

Элементы резания при финишной обработке труднообрабатываемых материалов

Проектирование и выбор режущего инструмента производится исходя из эмпирических зависимостей, определяющих геометрические параметры. Однако эти формулы несовершенны, носят частный характер и не имеют связи с аналитическими зависимостями. При этом для получения новых зависимостей необходимо проводить трудоемкие эксперименты. Аналитическое определение геометрических параметров инструмента до сих пор является проблемой и является важным этапом в теории резания. Постоянное увеличение точности обработки и качества поверхностного слоя требует расчета сил резания, которые определяют остаточные напряжения и отжимы детали.

Метод расчета напряженного и деформированного состояния зоны резания.

В современной теории резания металлов образование стружки объясняется как процесс сдвига, происходящий по плоскостям скольжения в обрабатываемом материале, в результате чего обрабатываемый материал пластически деформируется и отделяется от заготовки. Для пластической деформации металлов требуется приложить значительную силу, которая возрастает при обработке труднообрабатываемых материалов. Экспериментальные исследования образования стружки показывают, что сдвиг металла происходит по некоторой плоскости скалывания под углом *Q* к направлению движения инструмента. Этот угол является характерным параметром обрабатываемого материала и зависит от физико-механических свойств.

Определению сил резания посвящено большое количество работ [3, 4], в которых делается попытка аналитически определить силы резания. В работе [5] отмечается, что точное определение напряженно-деформированного состояния пластической зоны представляет большие трудности. В данных работах равновесие срезаемого элемента рассматривается не во времени, а как мгновенный акт в конечный момент сдвига. Поэтому расчетные силы резания отличаются от действительных. Также существуют работы, в которых процесс резания рассматривается как процесс, происходящий во времени, т.е. совокупность элементарных процессов сдвига, а не как мгновенное состояние срезаемого элемента. Силы резания при этом определяются интегральным путем и более приближены к действительным. При этом во всех методах есть несколько допущений:

1. Задний угол не оказывает влияния на силы резания;

2. Процесс стружкообразования рассматривается не только как сдвиг по плоскости скалывания, а также как сжатие элементов пластически деформированной зоны и их срез;

3. Деформация внутри сжимаемого элемента рассматривается во времени;

4. Дискретность процесса стружкообразования, определяемая величиной пути стружки, которые разделили по внешнему виду на стружки скалывания, сливные и надлома;

С этих позиций рассмотрим характер резания. При движении режущей кромки по направлению силы P_z обрабатываемый материал испытывает, с одной стороны, деформацию сжатия на участке ΔOAB и, с другой стороны, срез по направлению OA и в плоскости сдвига OF (см. рис. 6).

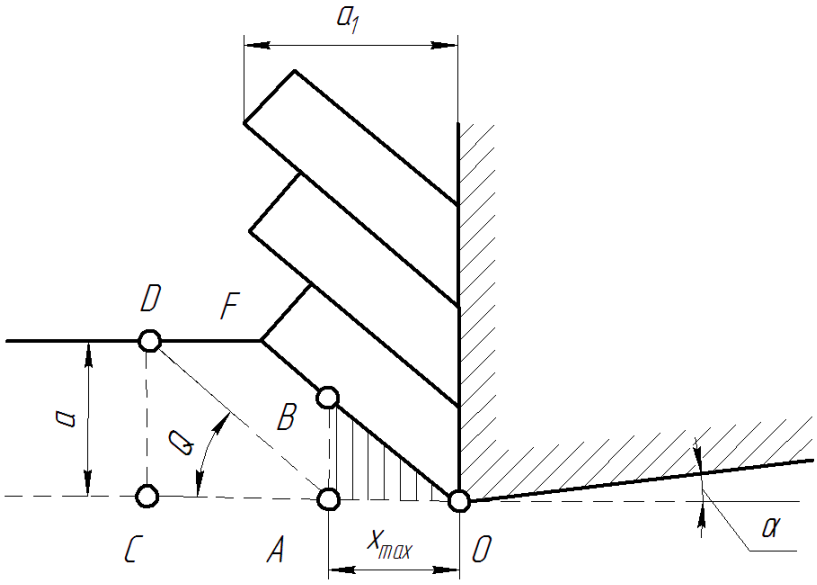


Рис. 6. Схема свободного резания

Таким образом, при принятой схеме стружкообразования со стороны обрабатываемого материала на переднюю поверхность инструмента действуют усилия сопротивления материала: сжатие P_1, перпендикулярное к линии AB, срез P_2 по линии OA и срез P_3 по линии OF.

Дифференциал усилия сжатия

$$dP_1 = \sigma_в b tg\theta dx,$$

дифференциал усилия среза

$$dP_2 = \tau_в b dx,$$

сила среза по линии OF,

$$dP_3 = \tau_в \frac{ab}{\sin\theta},$$

где $\sigma_в$ – предел прочности материала при сжатии, МПа; $\tau_в$ – предел прочности материала на срез, МПа; a – толщина срезаемого слоя, мм; b – ширина срезаемого слоя, мм; θ – угол скалывания, град; x – текущая координата, мм.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные методы определения напряжений не учитывают радиус округления лезвия, то есть рассматривается только острое лезвие. Математический анализ действующих сил упрощается. Рассматривая, что металлорежущий инструмент имеет определенный радиус округления лезвия необходимо вносить коррективы. Это особенно важно при срезании тонких стружек, характерных при финишной обработке. Сила в этом случае будет приложена к округлому участку, но направление этой силы будет отличаться от направления при рассматриваемом идеальном варианте. При этом направление будет меняться от точки к точке. При финишной обработке формируются тонкие слои снимаемого слоя, близкие по значению к радиусу округления лезвия, будет работать участок, который сминает обрабатываемый материал на величину h. В результате смятия обраба-

тываемый материал будет деформироваться, что значительно повысит остаточные напряжения. По данным [6] нагрузка на единицу длины кромки определяется:

$$\rho_н = \frac{\rho E}{9{,}35}\sin^2\theta,$$

где ρ – радиус округления лезвия, мм; E – модуль упругости, МПа; θ – угол скалывания, град.

Исходя из выражения можно определить радиус округления лезвия имея допустимую нагрузку на единицу длины $[\rho_н]$. Получим:

$$\rho = \frac{9{,}35[\rho_н]E}{E\sin^2\theta}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещака А. С., Третьяков И. П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
2. Гах В. М. [и др.]. Упрочняющее скругление кромок твердосплавного инструмента методом объемной вибрационной обработки // Вестник машиностроения. 1975. № 12. С. 44–47.
3. Аршинов В. А., Алексеев Г. А. Резание металлов и режущий инструмент: учебник для машиностроительных техникумов. Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
4. Башков В. М., Кацев П. Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. М.: Машиностроение, 1985. 130 с.
5. Реченко Д. С., Попов А. Ю. Технология высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов // Старый Оскол: ТНТ. 2015. 160 с.
6. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 150 с.

УДК 621.74.041

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ОТЛИВОК ПРИ ЛИТЬЕ В ВАКУУМНО-ПЛЕНОЧНЫЕ ФОРМЫ

М. Ю. Солнышков
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Изготовление отливок в вакуумно-пленочных формах (ВПФ) является высокоэффективной, ресурсосберегающей технологией, позволяющее получать литые изделия с более высокими параметрами качества, чем в обычных песчано-глинистых формах. Сложность физико-химических процессов, протекающих при формировании отливок в таких формах, с одной стороны ограничивает возможность использования этого способа для любых типоразмеров литья, с другой стороны не позволяет применять традиционные методы проектирования при разработке технологии. Целью работы является повышение эффективности и расширение области применения изготовления отливок в (ВПФ). В соответствии с этим задачей исследования является определение основных типоразмеров отливок, рекомендованных к изготовлению в ВПФ, выявление основополагающих специальных конструкторско-технологических объектов в ВПФ, влияющих на формирование отливки и позволяющих получать качественное литье. На основании ранее полученных экспериментальных данных проведен теоретический анализ, позволивший сделать следующие выводы: основными параметрами отливки, определяющими возможность ее изготовления в ВПФ, являются габаритные размеры, толщина стенок и величина разностенности; основополагающими конструкторско-технологическими объектами в ВПФ, влияющими на формирование отливки и позволяющие получать качественное литье являются литниково-питающая и, в большей степени, вентиляционная системы; основным направлением развития основ расчета и создания методик проектирования таких конструкций для ВПФ являются теплофизический расчет в системе: жидкий металл – полимерная пленка – краска – формовочный наполнитель и вакуумно-временной расчет в системе: объем наполнителя формы – поверхностный пленочно-фильтрационный слой – объем литейной полости.**

Ключевые слова: изготовление отливок, вакуумно-пленочная форма (ВПФ), фильтрационный слой в ВПФ, литниково-питающая система ВПФ, вентиляционная система ВПФ.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-17-20

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики, при высокой степени конкуренции и насыщенности рынка отечественной и главным образом, импортной продукцией машиностроения все чаще встают вопросы не только качественно- эксплуатационного сегмента, но в первую очередь параметры расходно-материального и ценового характера. В связи с этим, очевидно, что для выпуска конкурентно способных изделий, целесообразно направлять усилия на использование более дешевых исходных материалов и минимизацию их количественного расхода. Также, следует обращать внимание на использование менее дорогостоящих технологических процессов и средств, разрабатываемых для их производства. При этом конечные потребительские свойства таких изделий должны оставаться на должном уровне. Предпочтение следует отдавать высокоэффективным, энерго- и ресурсосберегающим технологиям изготовления, как конечной продукции, так и всех технологических переделов для ее производства.

Значительная часть различных деталей машин и механизмов изготавливается из фасонного литья, либо из литых заготовок. В области литейного производства практически все свойства и характеристики будущих отливок из любого сплава, такие как размерная точность, чистота поверхности, величина припусков на механическую обработку, наличие внутренних и поверхностных дефектов и т.д., определяются свойствами литейной формы и условиями формирования отливок в ней. Наиболее массовый традиционный способ изготовления отливок в разовых песчано-глинистых формах (ПГФ), связанный с огромными затратами на смесеприготовление, формообразование, выбивку и очистку литья, давно уже является недостаточно эффективным.

Производство отливок в разовых вакуумно-пленочных формах (ВПФ) является одной из перспективных технологий получения отливок. Изготовление ВПФ – высокоэффективный, малоотходный процесс формообразования, характеризующийся резким уменьшением расхода формовочных материалов, существенным снижением трудоемкости, значительным улучшением санитарно-гигиенических условий труда. Отливки, получаемые в таких формах, по сравнению с отливками обычных ПГФ, имеют более высокие размерную и весовую точность, а также качество поверхности. Однако, не смотря на неоспоримые преимущества и кажущуюся простоту процесса формообразования, далеко не все типоразмеры отливок можно изготавливать в таких формах [1].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачей исследования в данной работе является теоретическое определение основных типоразмеров отливок, рекомендованных к изготовлению в ВПФ, выявление основополагающих специальных конструкторско-технологических объектов в ВПФ, влияющих на формирование отливки и позволяющих получать качественное литье.

III. ТЕОРИЯ

Изучение и экспериментальное исследование процессов, протекающих в ВПФ при ее формообразовании [2], а также физико-химических процессов, протекающих при ее заполнении жидким расплавом и последующей кристаллизации отливки [3], позволяет сформулировать следующие основные закономерности формирования отливки. При заполнении литейной формы расплавленным металлом происходит быстрый нагрев газов в литейной полости. Тепловое взаимодействие с движущимся расплавом и с горячими газами приводит к нагреву поверхностного слоя формы в каналах литниково-питающей системы и по всему объему литейной полости. При этом пленка, оформляющая эти поверхности, плавится и под действием вакуумирующих сил фильтруется в поверхностный слой песчаного наполнителя формы. Одновременно протекает процесс деструкции фильтрата. Глубина фильтрации и степень деструкции определяют устойчивость стенок ВПФ и возможность получения бездефектных высококачественных отливок.

IV. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Исходя из этих закономерностей, в первом приближении, можно сформулировать основные положения параметрических характеристик отливок, изготовление которых в ВПФ является наиболее целесообразным:

1. Среднее и, особенно, крупное по габаритным размерам литье, для которого изготовление литейных форм сопряжено с огромными затратами (металлические формы), или со значительной энергономикой (круп-

ное энергоемкое формовочное оборудование), или с существенным расходом дорогих формовочных материалов (разовые ПГФ).

2. Относительно тонкостенное литье, предельная толщина стенок которого зависит от соотношения двух факторов: времени заполнения формы с последующей кристаллизацией сплава и времени устойчивости стенок формы при ее физико-химическом взаимодействии с движущимся жидким и кристаллизующимся металлом.

3. Равностенное литье с незначительными перепадами толщин стенок отливки, без тепловых узлов и местных утолщений.

4. Отливки практически любой массы, для которых выполняются первые три положения.

5. При анализе возможности изготовления конкретной отливки необходимо иметь в виду, что некоторые конструкторско-технологические решения в ВПФ, или назначение определенных режимов литья на стадиях проектирования, разработки и отладки технологического процесса могут существенно раздвинуть границы и возможности получения на первый взгляд не технологичных для этого метода отливок.

Следует отметить, что в настоящее время не существует специальных методик расчета различных технологических систем и основных конструктивных элементов ВПФ, а также технологических параметров изготовления таких форм. Поэтому при разработке технологического процесса изготовления отливок в ВПФ, как правило, используются традиционные методики расчетов для обычных ПГФ с последующей доводкой по результатам первых заливок. Для повышения эффективности проектно-технологических работ несомненным является необходимость разработки новых методик расчетов, основывающихся на реальных процессах, протекающих в литейной форме на стадии формирования отливки и позволяющих вырабатывать наиболее оптимальные технологические решения.

Помимо традиционных расчетных величин, используемых при проектировании технологического процесса изготовления отливки, таких как: металлостатический напор, высота отливки по положению при заливке; температура заливки и вязкодинамические свойства сплава; время и скорость заполнения формы; ее необходимые прочностные и технологические характеристики, при определении возможности изготовления конкретной отливки в ВПФ следует определять и анализировать дополнительные факторы, влияющие на механизм формирования отливки в такой форме. К таким факторам можно отнести: максимально возможную величину перегрева, интервал кристаллизации и основность заливаемого сплава; суммарную площадь поверхности отливки и ее соотношение с объемом литейной полости; теплофизические свойства и толщину слоя противопригарного покрытия; фильтрационные характеристики наполнителя формы и динамику их изменения. Необходимо провести критериальный теплофизический расчет системы теплового взаимодействия: жидкий металл – полимерная пленка – краска – формовочный наполнитель для определения предельно допустимых термо-временных режимов заполнения формы. Рассчитанные величины оптимальных температуры заливки, а также времени заполнения формы могут быть положены в основу конструирования и расчетов литниково-питающей системы (ЛПС), обеспечивающей максимально быстрое заполнение литейной полости при минимально возможном динамическом воздействии на рабочие поверхности ВПФ. Использование этих положений позволит предотвратить не только местные разрушения в литейной полости формы при ее заполнении жидким металлом, но и полностью исключить явления эрозии и искажения рабочих поверхностей. Существующие в настоящее время методики расчета ЛПС базируются в своей основе на законы и явления гидравлики, не учитывающие вышеуказанные физико-химические процессы, протекающие в ВПФ при заливке.

С другой стороны устойчивость рабочих поверхностей и стенок ВПФ определяется ее газовым режимом. Для его правильной организации необходимо провести вакуумно-временной расчет в системе: объем наполнителя формы – поверхностный пленочно-фильтрационный слой – объем литейной полости для определения предельно допустимых газодинамических режимов работы ВПФ. Рассчитанные величины оптимального разряжения в форме, допустимого газового давления в поверхностном слое и предельного газового противодавления в литейной полости могут быть положены в основу конструирования и расчетов вентиляционной системы, обеспечивающей спокойный отвод газов из литейной полости и необходимую динамику движения фильтрата в поверхностном слое ВПФ. Существующие в настоящее время методики расчета подобных систем также не отражают в полной мере процессы, протекающие в ВПФ, при ее заливке.

Таким образом, в настоящее время перспективным направлением освоения и развития способа литья в ВПФ является, во-первых, дальнейшее совершенствование основ расчета физико-химических процессов, протекающих в литейной форме с целью обоснования и оптимизации назначаемых технологических параметров заливки. Во-вторых, создание методик проектирования и расчет специализированных конструкторско-технологических объектов, таких как литниково-питающие, вентиляционные системы и их составляющие элементы.

V. ВЫВОДЫ

1. Основными параметрами отливки, определяющими возможность ее изготовления в ВПФ, являются габаритные размеры, толщина стенок и величина разностенности.

2. Основополагающими конструкторско-технологическими объектами в ВПФ, влияющими на формирование отливки и позволяющие получать качественное литье являются литниково-питающая и в большей степени вентиляционная системы.

3. Основным направлением развития основ расчета и создания методик проектирования таких конструкций для ВПФ являются теплофизический расчет в системе: жидкий металл - полимерная пленка – краска – формовочный наполнитель и вакуумно-временной расчет в системе: объем наполнителя формы – поверхностный пленочно-фильтрационный слой – объем литейной полости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнышков М. Ю., Васильев В. А. Брак отливок из серого чугуна, полученных методом вакуумно-пленочной формовки и способы борьбы с ним // Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве. Омск: ОмПИ, 1989. С. 88–92.

2. Солнышков М. Ю., Горбунов О. А., Васильев В. А. Формирование прочности литейной формы при вакуумно-пленочной формовке // Литейное производство. 1987. № 1. С. 16–17.

3. Солнышков М. Ю., Сабралиев Н. С., Васильев В. А. Кинетика газообразования в вакуумируемых формах // Литейное производство 1986. № 7. С. 11–12.

УДК 531.7:54.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ С ПОМОЩЬЮ ЭТАЛОННОГО КОЛЬЦА

А. В. Тигнибидин, С. Х. Хужамуратов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В последнее время использование на производстве координатно-измерительных машин (КИМ) позволяет оперативно измерять геометрические параметры простых и сложных деталей, включая те детали, измерение которых традиционными способами требует дорогостоящей специальной оснастки. В данной статье приведены экспериментальные исследования измерения эталонного кольца на портальной КИМ Mitutoyo в разных положениях, под разными углами и разным положением калибровки измерительного наконечника.**

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, эталонное кольцо, погрешность

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-20-23

I. ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении, приборостроении и других областях промышленности используются различные измерительные приборы. К ним относятся микрометр, глубиномер, КИМ и т.д. Координатные измерения давно привлекали конструкторов и метрологов, потому что измерения отдельных параметров сложных деталей (коленчатых и распределительных валов, турбинных лопаток, корпусных деталей с большим количеством отверстий и др.) универсальными средствами и с помощью специальных приспособлений не давали полного представления об их годности для сборки и эксплуатационных качествах. Универсальные средства, многомерные устройства и автоматы тоже не давали ясного представления о взаимном положении, ориентации и позиционировании отдельных элементов сложных деталей. В итоге до появления КИМ многие задачи измерения геометрических параметров деталей не могли быть решены.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

КИМ как и другие средства измерений имеет погрешности при измерений. Погрешность средства измерений представляет собой разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины. Погрешности бывают случайные, систематические и др. Систематическая погрешность может появляться в результате механического износа деталей в измерительной машине или старением электронных компонентов. Для выявления случайных погрешностей проводится многократное измерение одной и той же величины, одним и тем же средством измерения, при одинаковых условиях.

III. Теория

MPE – Maximum Permissible Error (максимальная допустимая погрешность). По нормам ISO 10360 каждая спецификация точности обозначается как MPE. Она указывает предельное значение, за границы которого не может выходить погрешность при выполнении измерительного задания. Измерительное задание обозначается индексом. MPE_E, например, обозначает погрешность линейного измерения, а MPE_P – погрешность касания. Для определения погрешности касания при сканировании сканируется сфера (диаметр 25 мм) с незначительной погрешностью формы по 5 точкам, установленным в ISO 10360-4. При сравнении измеренных значений с MPE_E и MPE_P спецификацией должны быть выполнены два условия.

Во-первых, размах радиальных удалений, определенный через отдельные точки, от заменяющего шара не должен превышать значение спецификации.

Во-вторых, разница между радиальными дистанциями и откалиброванным диаметром сферы не должна быть больше, чем значение спецификации. Кроме того, требуемое для проверки время должно соответствовать спецификации, так как скорость имеет существенное влияние на результат. Указание точности и требуемого времени при проверке погрешности касания при сканировании является важным показателем производительности КИМ.

Предельное значение измерения формы MPE. Измерение производится на эталонном кольце диаметром 60 мм с незначительной погрешностью формы с высокой плотностью точек в режиме сканирования. Из измеренных значений рассчитывается так называемая окружность Чебышева (MZC = MinimumZoneCircle). Отклонение формы получается как размах радиальных удалений от этой окружности. Он не должен превышать значения спецификации.

IV. Результаты экспериментов

Измерения проводились в трех положениях калибровки измерительной головки КИМ: 0˚, 45˚, 90˚.

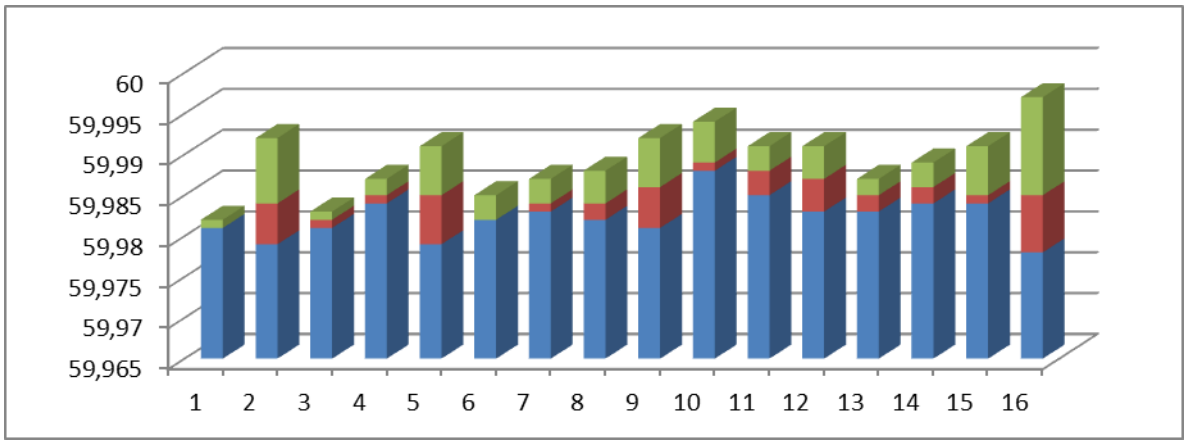


Рис. 1. Результаты измерения диаметра эталонного кольца при положении измерительной головки 0˚

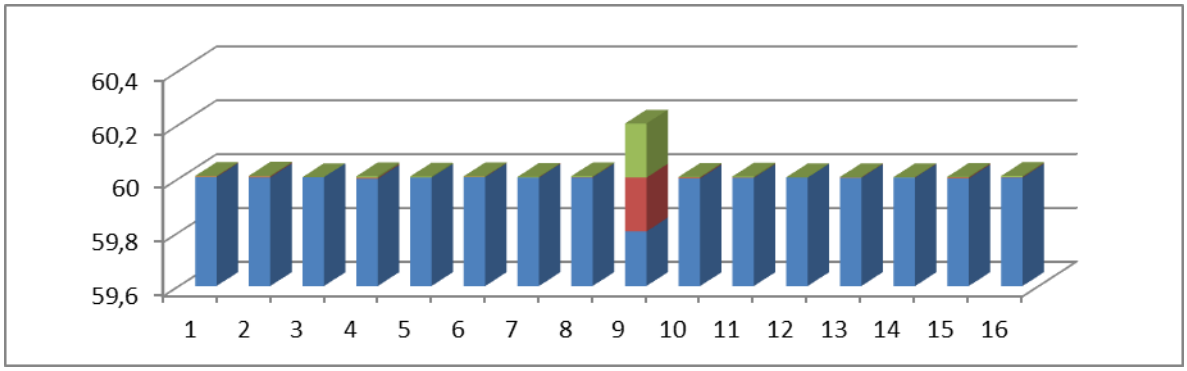


Рис. 2. Результаты измерения диаметра эталонного кольца при положении измерительной головки 45˚

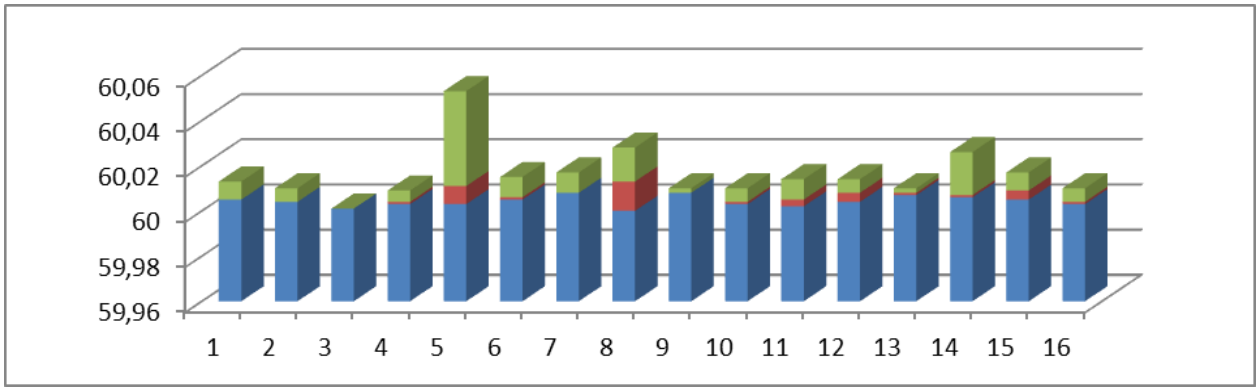


Рис. 3. Результаты измерения диаметра эталонного кольца при положении измерительной головки 90˚

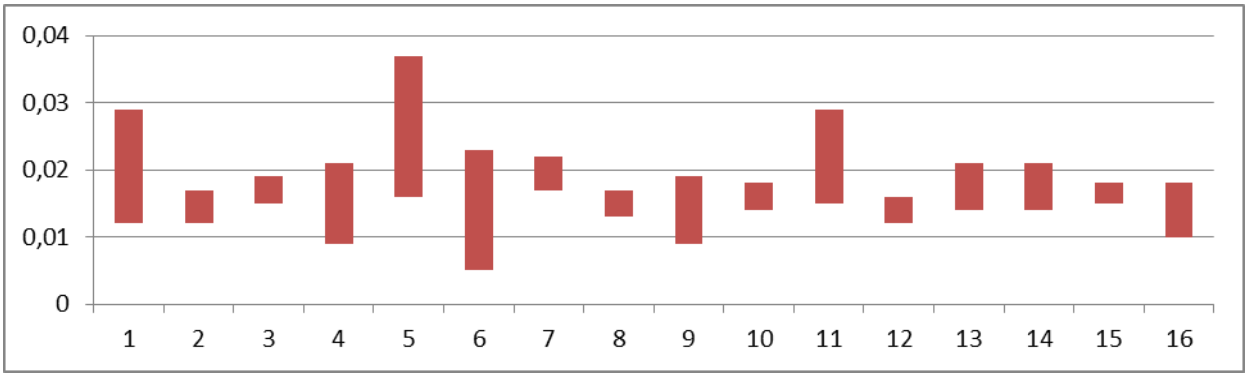


Рис. 4. Отклонения от круглости при 0˚

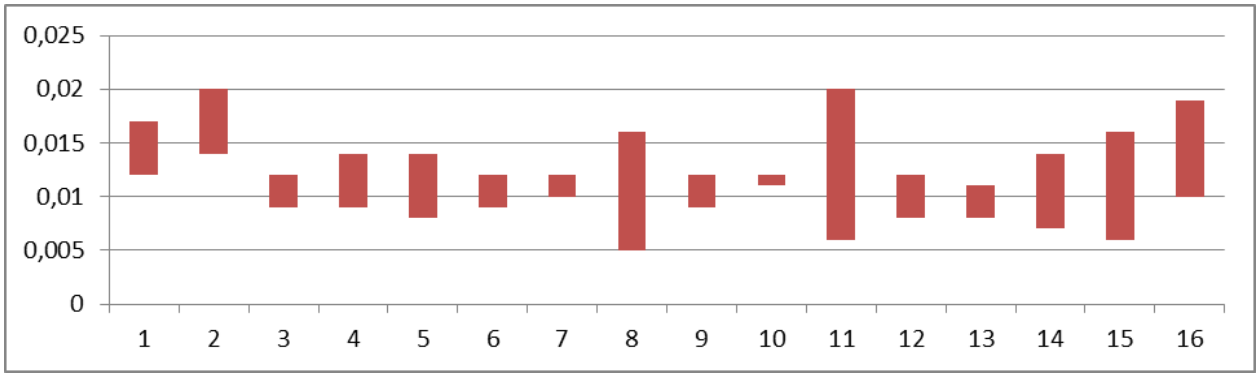


Рис. 5. Отклонения от круглости при 45˚

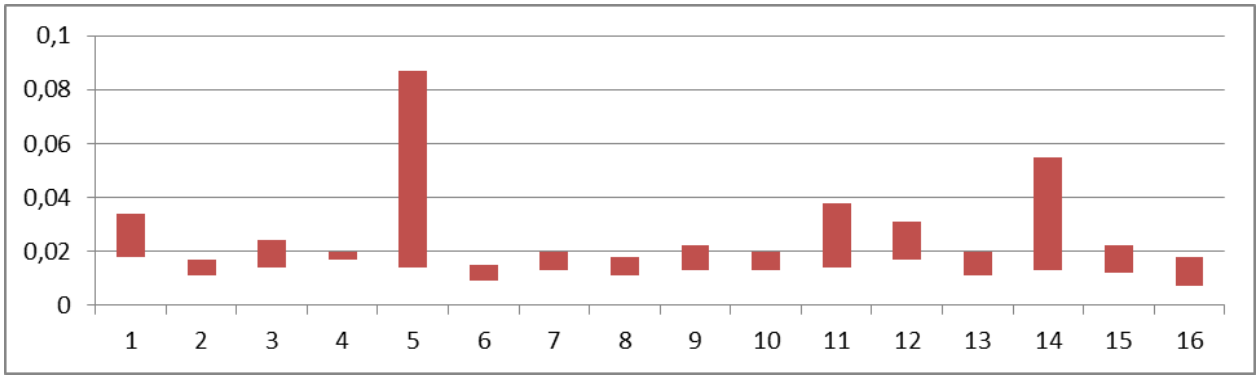


Рис. 6. Отклонения от круглости при 90˚

V. Обсуждение результатов

Методика выполнения измерения эталонного кольца диаметром 60 мм проведены на КИМ Crysta-plus M443, фирмы Mitutoyo. Рабочая измерительная зона была разделена на 16 участков и в каждом участке были проведены измерения по три раза. Измерения проводились в ручном режиме, в трех сечениях цилиндра по 12 точек в каждом из них.

Рис. 7. Портальная КИМ Mitutoyo Crysta-plus M443

Благодаря проведению исследований на КИМ с эталонной деталью, можно получить наиболее приближенные значения к реальным геометрическим характеристикам детали.

VI. Выводы и заключение

Координатно-измерительные машины (КИМ) уже достаточно долго применяются в различных производственных процессах. С их помощью автоматизируются процессы измерения и наладки в автоматизированных комплексах машиностроения.

При проведении измерений эталонного кольца некоторые результаты выходили за диапазон погрешности КИМ. Результат многократных измерений показал, что удаление от места калибровки влияет на результат измерения.

Список литературы

1. Бражкин Б. С., Исаев Н. И., Кудинов А. А., Миротворский В. С. Координатно-измерительные машины для контроля тел вращения. М. : Миттель Пресс, 2012. 207 с.

2. Гапшис В.А. [и др.] Координатные измерительные машины и их применение. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
3. Сурков И. В. Применение КИМ для контроля линейных и угловых параметров зубчатых колес // Оборудование и инструмент. 2007. № 5 (93). С. 86–89.
4. ТУ 3943-003-05748542-05. Кольца измерительные для нутромеров. Технические характеристики.

УДК 621.314

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОБЫЧИ НЕФТИ

В. В. Аникин[1], В. З. Ковалев[2], Р. Н. Хамитов[3], В. О. Бессонов[2]
[1]*Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия*
[2]*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия*
[3]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

Аннотация. **Надежное и энергосберегающее частотное управление погружными асинхронными электродвигателями требует исследование его работы в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов на базе моделирования. Данный подход ориентирован на разработку методов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Целью исследования являлось исследование работы погружных асинхронных электродвигателей в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов. Рассмотрен способ определения эксплуатационных параметров и построения рабочих характеристик погружных асинхронных электродвигателей на основе параметров его Т-образной схемы замещения. На базе рассмотренного способа разработано программное обеспечение в системе Matlab 7, предназначенное для расчета параметров двигателей и построения семейства его рабочих характеристик.**

Ключевые слова: погружной асинхронный электродвигатель, схема замещения, программное обеспечение, эксплуатационные параметры, рабочие характеристики.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-24-28

I. Введение

В нефтедобывающей отрасли самым распространённым электродвигателем является трехфазный погружной асинхронный двигатель с частотным регулированием. Асинхронные двигатели являются самыми надежными при эксплуатации в условиях высоких температур и агрессивной среде нефтяного месторождения, по сравнению с электродвигателем других типов [1].

Необходимость в предэксплуатационной идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя (ПЭД) возникает при частотном и векторном регулировании скорости вращения и электромагнитного момента ПЭД для организации надежных и оптимальных режимов эксплуатации в составе электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН).

Методы идентификации, связанные с вращением ПЭД на поверхности, требует для своей реализации использования совместимого с конструкцией ПЭД оборудования, заменяющего реальную нагрузку на валу в виде УЭЦН, либо наличия дорогостоящих специализированных стендов для приемо-сдаточных испытаний, которыми оснащаются заводы-изготовители ПЭД. Однако имеется возможность усовершенствования подхода на базе методик параметрической идентификации непосредственно по кривой затухания тока обмотки статора, не требующих трудоемкого и сложного дополнительного перехода к частотным характеристикам. Модели послеремонтных ПЭД позволяют оценить технические состояния ПЭД и его возможности для продолжения работы в составе ЭТК УЭЦН.

II. Постановка задачи

Особую актуальность приобретает задача оценки изменённого технического состояния погружных асинхронных электродвигателей прошедших капитальный или средний ремонт в сервисных предприятиях по ремонту нефтепогружного оборудования [2]. Рабочие характеристики послеремонтных асинхронных электродвигателей могут значительно отличаться от характеристик нового двигателя, что может привести к отклонению параметров технологического процесса нефтедобычи.

III. Теория

Для получения рабочих характеристик асинхронного двигателя используем его схему замещения для одной фазы, на рис. 1 показана Т-образная схема замещения [3, 4].

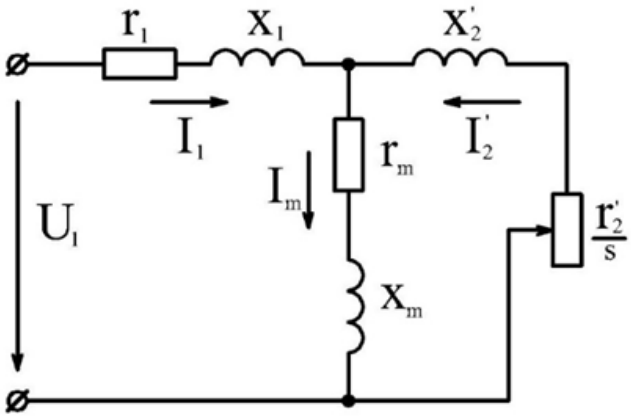


Рис. 1. Т-образная схема замещения 1-ой фазы ПЭД

По схеме замещения r_1, r_2', r_m – активные сопротивления фаз статора, ротора и ветви намагничивания, x_1, x_2', x_m – индуктивные сопротивления рассеяния статора, ротора и ветви намагничивания.

Определение рабочих характеристик через параметры Т-образной схемы замещения в зависимости от скольжения можно свести к последовательному применению следующих расчетных соотношений [5].

Полное сопротивление Т-образной схемы замещения ПЭД

$$\dot{z} = r_1 + jx_1 + \frac{(r_m + jx_m)\cdot(\frac{r_2'}{s} + jx_2')}{(r_m + jx_m) + (\frac{r_2'}{s} + jx_2')}, \quad (1)$$

Ток в обмотке статора ПЭД

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3}\cdot\dot{z}}, \quad (2)$$

Приведенное падение напряжения в обмотке ротора ПЭД

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_1 \cdot \frac{(r_m + jx_m)\cdot\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right)}{(r_m + jx_m) + \left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right)}. \quad (3)$$

Приведенный ток в обмотке ротора ПЭД

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\frac{r_2'}{s} + jx_2'}. \quad (4)$$

Выходная мощность ПЭД

$$P_2 = m_1 \cdot |I_2'|^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot (1 - s), \quad (5)$$

где m_1 – число фаз.

Вращающий момент на валу ПЭД

$$M_2 = \frac{m_1 p}{\omega_1} \cdot |I_2'|^2 \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot (1 - s), \quad (6)$$

где p – число пар полюсов.

Потери мощности в обмотке ротора ПЭД

$$\Delta P_2 = m_1 \cdot |I_2'|^2 \cdot r_2'. \quad (7)$$

Ток в ветви намагничивания ПЭД

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_2}{r_m + jx_m}. \quad (8)$$

Суммарные потери мощности в ПЭД

$$P = m_1 \cdot |I_1|^2 \cdot r_1 + m_1 \cdot |I_m|^2 \cdot r_m + m_1 \cdot |I_2'|^2 \cdot r_2'. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия ПЭД

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}. \quad (10)$$

Реактивная мощность ПЭД

$$Q = m_1 \cdot |I_1|^2 \cdot x_1 + m_1 \cdot |I_m|^2 \cdot x_m + m_1 \cdot |I_2'|^2 \cdot x_2'. \quad (11)$$

Полная мощность ПЭД

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (12)$$

Коэффициент мощности ПЭД

$$Cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (13)$$

Критическое скольжение

$$s_{кр} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (14)$$

Пусковой момент

$$M_п = \frac{2M_{кр} \cdot (1 + s_{кр} \cdot \frac{r_1}{r_2'})}{s_{кр} + \frac{1}{s_{кр}} + s_{кр} \cdot \frac{2r_1}{r_2'}}. \quad (15)$$

Подстановка в формулы 1...13 величин скольжений номинального s_n, критического $s_{кр}$, пускового $s = 1$ режимов и режима идеального холостого хода $s = 0$ позволяет получить значения параметров ПЭД, относящихся к данным условиям их эксплуатации. На основе формул 1...15 разработана программа SZ_MH11 для оперативного определения эксплуатационных параметров ПЭД, реализованная в системе Matlab 7 [6].

IV. Результаты экспериментов

Панель управления программой (рис. 2) имеет интерфейс удобный для использования в цеховых условиях предприятий по ремонту погружных асинхронных электродвигателей. Исходные данные для программы SZ_MH11 – параметры Т-образной схемы замещения ПЭД (x_1, x_2' – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки статора и приведенной обмотки ротора, x_m – индуктивное сопротивление ветви намагничивания), величина $U_л$ и частота f напряжения, подводимого к обмотке статора ПЭД, число фаз ПЭД m_1, номинальное значение скольжения s_n и число пар полюсов $2p$ – заносятся пользователем в соответствующие окна панели управления.

Кнопкой «Расчет» после ввода исходных данных рассчитываются каталожные данные и выводятся на панель (рис. 2а). Кнопка «некоторые параметры и коэффициенты» служит для вывода на панель управления SZ_MH11 сведений о параметрах ПЭД в режимах пуска и идеального холостого хода (рис. 2б). При нажатии кнопки «дополнительные возможности» выводятся рабочие характеристики двигателя (рис. 2в).

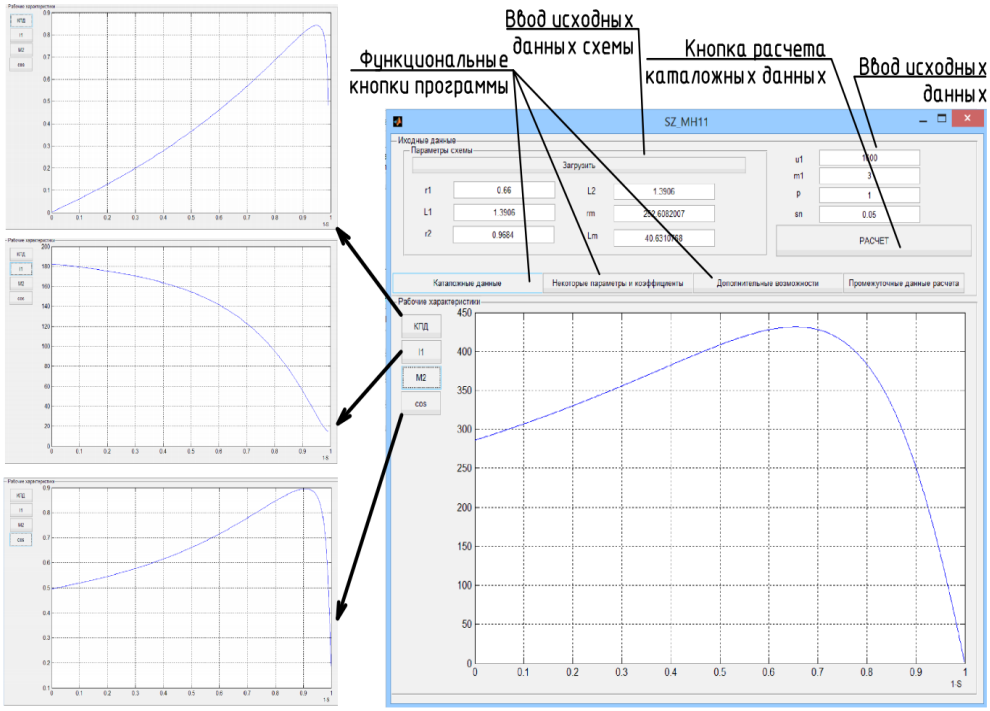


Рис. 2. Панель управления (интерфейс) программы SZ_MH11

V. Обсуждение результатов

Результаты, представленные на рис. 2, получены для ПЭД типа ЭД(Т)12-117-380 на основании идентификационных параметров Т-образной схемы замещения. Эти результаты, а также данные по определению каталожных параметров ПЭД типов 1ЭД(Т)45-117-1000, 1ЭД(Т)63-117-1000 на основе идентификации параметров их схем замещения приведены в табл. 1 вместе с известными каталожными параметрами этих ПЭД. Там же указаны отклонения полученных параметров ПЭД от номинальных значений. Данные, приведенные в таблице. свидетельствуют о следующем. Эксплуатационные параметры рассматриваемых типов ПЭД получены средствами программы SZ_MH11 на основе параметров их схем замещения. Наблюдаются положительные и отрицательные отклонения полученных эксплуатационных параметров от их номинальных значений [7].

Наименьшие отклонения имеют энергетические параметры ПЭД – коэффициент полезного действия η и коэффициент мощности $Cos\varphi$ (не более -2% у обоих). Наибольшее отклонение, достигающее значения (-9,67%), имеет входной ток ПЭД.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЭД

Двигатель		*Эксплуатационные параметры погружных асинхронных двигателей*							
		I_1, *А*	P_2, *кВт*	η, *%*	$Cos\varphi$, , *о.е.*	n_2, *об/мин*	$M_п/M_н$, *о.е.*	$M_{кр}/M_н$, *о.е.*	$I_п/I_н$, *о.е.*
ЭД(Т) 12-117-380									
10,5 *А* I_0	*Изв.*	*26*	*12*	*84*	*0,85*	*2850*	*-*	*-*	*-*
	Получ.	***25.31***	***11.122***	***84.432***	***0.858***	***2850***	***2.250***	***3,100***	***5,783***
	Расхожд.,%	*-2.65*	*-7.33*	*0,51*	*0.94*	*0*	*-*	*-*	*-*
ЭД(Т) 45-117-1000									
I_0 18 *А*	*Изв.*	*36,5*	*45*	*85*	*0,86*	*2850*	*-*	*-*	*-*
	Получ.	***34,14***	***43.926***	***83.538***	***0.858***	***2850***	***2.023***	***3,073***	***5,399***
	Расхожд.,%	*-6,46*	*-2.38*	*-1,72*	*-0,23*	*0*	*-*	*-*	*-*
ЭД(Т) 63-117-1000									
I_0 24 *А*	*Изв.*	*51.5*	*63*	*85*	*0,85*	*2844*	*-*	*-*	*-*
	Получ.	***46.53***	***65.203***	***85.500***	***0.864***	***2844***	***2.082***	***3,045***	**5,577**
	Расхожд.,%	*-9.67*	*3,38*	*0.58*	*1,64*	*0*	*-*	*-*	*-*

VI. Выводы и заключение

Результаты расчёта показывают достаточную степень точности программы SZ_MH11, и определяет возможность и целесообразность ее применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования для определения измененного технического состояния ПЭД послеремонтного обслуживания и контроля его эксплуатационных параметров [8].

Список литературы

1. Ковалев А. Ю., Ковалев Ю. З., Солодянкин А. С. Электротехнологические установки насосной эксплуатации скважин : моногр. Нижевартовск : изд-во НГГУ, 2010. 173 с.

2. Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. Послеремонтное определение эквивалентных параметров асинхронного электродвигателя без применения нагрузочного устройства – электродвигатель с короткозамкнутым ротором // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 76–79.

3. Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 162.

4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 543 с.

5. Кетков Ю. Л., Кетков А. Ю., Шульц М. М. MATLAB 7: программирование, численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 737 с.

6. Аникин В. В., Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю. Программное обеспечение для расчета параметров схемы замещения асинхронного погружного электродвигателя: программа для ЭВМ. М. : ФИПС, 2012. № 2012661262.

7. Электродвигатели погружные асинхронные теплостойкие. Технические условия ТУ3381-026-21945400-97. Введ. 20.01.1998. 179 с.

8. Ковалев В. З., Хамитов Р. Н., Кузнецов Е. М., Аникин В. В., Бессонов В. О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. 2018. № 6(162). С. 36–40.

УДК 621.314.261

УСТАНОВКА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В. В. Аникин

Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия

Аннотация. **Частотное управление погружными асинхронными электродвигателями требует исследование его работы в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов на базе моделирования. Данный подход ориентирован на разработку методов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Целью разработки являлось создание установки для регистрации и обработки экспериментальной кривой затухания тока статора погружного асинхронного двигателя. Приводится описание конструкции и принципа действия установки для регистрации и обработки кривой затухания тока статора погружного асинхронного двигателя. Установка позволяет реализовать методику для определения параметров Т-образной схемы замещения погружных асинхронных электродвигателей с использованием интеграла кривой затухания тока обмотки статора без дополнительного перехода к частотным характеристикам. Мобильная установка способна достоверно регистрировать в электротехнических объектах с индуктивной реакцией переходные процессы затухания тока в диапазоне от 1А до 15А с относительной погрешностью не более 2% и в диапазоне тока от 1А до 0,1А с относительной погрешностью не более 6% при длительности переходных процессов от 0,07 с.**

Ключевые слова: стенд, испытания, схема, переходная характеристика, погрешность.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-28-33

I. Введение

Надежное и энергосберегающее частотное управление погружными асинхронными электродвигателями (ПЭД) требует исследование его работы в составе электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). Этот подход ориентирован на разработку методов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Информация о состоянии ПЭД особа актуальна для сер-

висных организаций, обслуживающих ЭТК УЭЦН нефтедобывающих предприятий, для предэксплуатационной оценки технического состояния отремонтированных асинхронных ПЭД. Данный подход можно реализовать без наличия сложного испытательного оборудования для исследования ПЭД, он делает возможным определение энергетических показателей, пусковых, рабочих, механических характеристик ПЭД в составе ЭТК УЭЦН непосредственно на нефтяных месторождениях. Данная информация позволяет обеспечить оптимальные и надежные режимы эксплуатации послеремонтных асинхронных ПЭД ЭТК УЭЦН в скважинах, что в конечном итоге скажется на надежности работы всего куста нефтяного месторождения.

II. Постановка задачи

Установка для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей должна иметь малое выходное сопротивление, удовлетворяющее условию: внутреннее сопротивление установки – значительно меньше, чем сопротивления фазы статорной обмотки ПЭД, и не влиять на характеристику затухания тока статора. Установка должна позволить определять параметры схем замещения ПЭД, включать возможность работы в нелинейных режимах, вызванных насыщением магнитной системы ПЭД и эффектом вытеснения тока в глубокопазных машинах. Принцип действия установки основывается на цифровой регистрации переходной характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД, программном определении параметров схем замещения, однозначно связанных с временной характеристикой тока статора. Выдача результатов должна осуществляться в удобной для оператора форме.

III. Разработка и описание установки

Для идентификации эквивалентных параметров погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) разработана и эксплуатируются кейсовая (переносная) установка [1], рис. 1.

Рис. 1. Установки идентификации параметров ПЭД

Установка позволяет определять параметры схемы замещения ПЭД в широком диапазоне режимов работы (до 30...50 А), включая нелинейные режимы, вызванные насыщением магнитной системы ПЭД и эффектом вытеснения тока в глубокопазных электродвигателях. Принцип действия установок основан на цифровой регистрации переходной характеристики затухания $i_{1\text{эксп}}(t)$ обмотки статора ПЭД, программном определении параметров схем замещения однозначно связанных с характеристикой $i_{1\text{эксп}}(t)$ и выдаче их в удобной для пользователя форме.

При испытании ПЭД переходная характеристика $i_{1\text{эксп}}(t)$ аппроксимируется суммой экспоненциальных составляющих, количество которых определяет степень адекватности схемы замещения ПЭД и задается в программной части установки. Параметры экспоненциальных составляющих находятся программным путем. По полученным данным вычисляются параметры схемы замещения ПЭД при заданной ее структуре.

Основой измерителя (рис. 2) является контроллер ATmega16 DD2 принимающий данные с платы управления для задания режимов силовому модулю на MOSFET транзсторах IRL 2505. Второй контроллер DD1 аналогичной модели обеспечивает необходимые режимы для формирования тока, а так же индикацию текущего тока и напряжения на жидкокристаллическом индикаторе в измеряемой цепи посредством датчиков тока, встроенных в выходую цепь измерителя. Источник напряжения на аккумуляторной батареи Delta HR 12-7.2 12 В / 7,2 А·ч способен выдавать ток до 20А при полном отсутствии пульсаций для получения качественной переходной характеристики и стабильности процесса измерения.

Контроллер серии ATmega16 8-разрядный высокопроизводительный AVR микроконтроллер с малым потреблением, и прогрессивной RISC архитектурой 130 высокопроизводительных команд, большинство команд выполняется за один тактовый цикл.

Контроллеры DD1, DD2 реализуют настройку измерителя на необходимый режим получения переходной характеристики и организацию процесса измерения в автоматическом режиме с выдачей сигнала запуска сбора аналого-цифровому преобразователю.

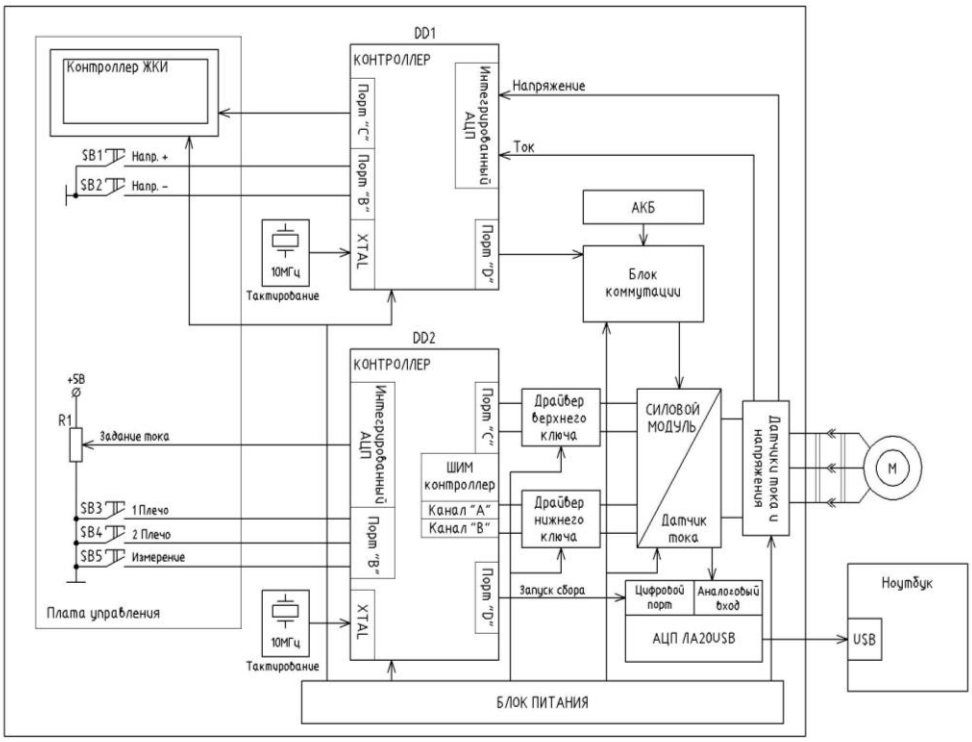


Рис. 2. Функциональная схема измерителя

Управление ключами силовой части реализует контроллер DD2 с помощью драйверов верхнего и нижнего ключа выполненных на микросхеме IR2113 рис. 3, а так же производит формирование ШИМ сигнала с регулируемой скважностью для нижних ключей транзисторов силового модуля.

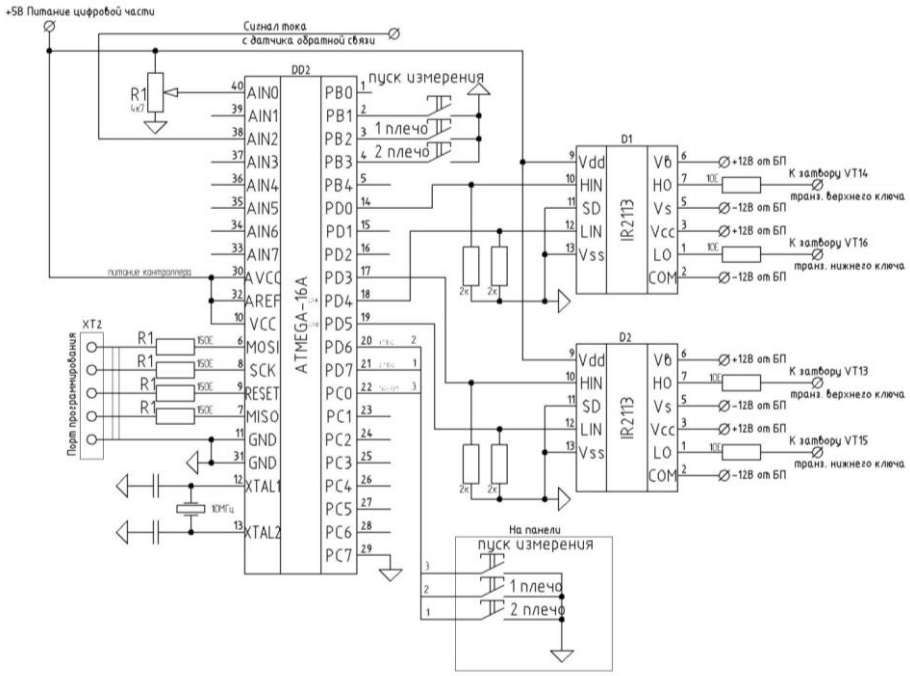


Рис. 3. Принципиальная схема управления силовым модулем

Задание тока реализуется с помощью переменного реостата R1, напряжение с которого измеряется интегрированным АЦП микроконтроллера DD2, канал AIN0. Контроллер пропорционально измеренному напряжению изменяет скважность ШИМ сигнала одного из транзисторов нижних ключей для регулирования тока в обмотке измеряемого двигателя подключаемого в диагональ моста транзисторов силового модуля рис. 4.

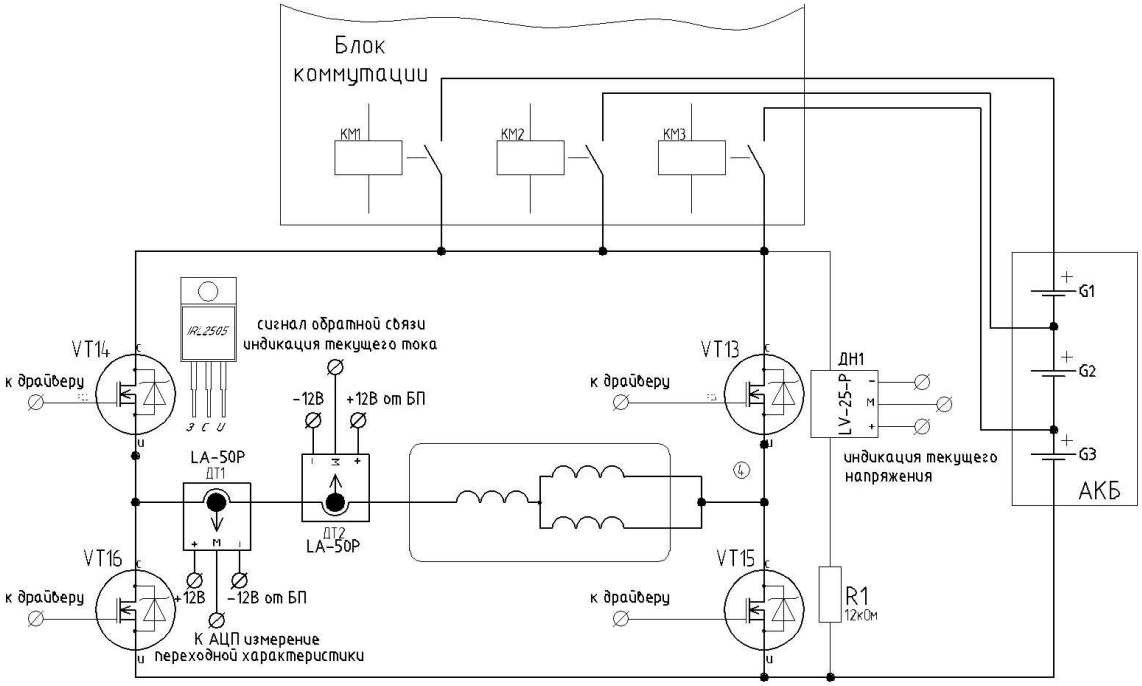


Рис. 4. Принципиальная схема силового модуля с датчиками

Для измерения тока используются датчики ДТ1, ДТ2 типа LA 50-P – компенсационные датчики на эффекте Холла, предназначенные для электронного преобразования токов постоянного, переменного, импульсного и т.д. в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

Изменение напряжения производится ступенчато путем подключения разного количества аккумуляторов на вход силового модуля, для этого на плате управления установлены кнопки «↑», «↓» (рис. 5).

Рис. 5. Внешний вид платы управления

Измерительная часть рис. 6 состоит из датчика тока ДТ1 с прецизионным резистором R15 390 Ом и отдельным стабилизованным блоком питания. Сигнал с прецизионного резистора поступает на аналоговый вход 16-ти канальной 12-ти разрядной платы устройства сбора данных (АЦП) ЛА20USB которое по USB кабелю соединяется с ноутбуком.

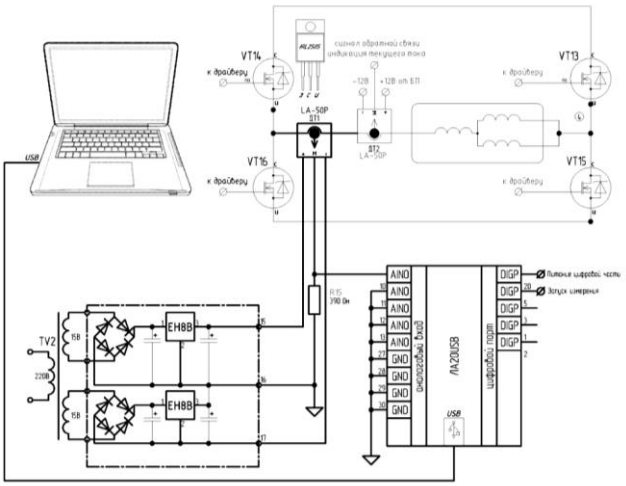


Рис. 6. Принципиальная схема измерительной части

Конструктивные узлы измерителя рис. 7, 8 выполнены на печатных платах, монтаж выполнен несколькими ярусами для установки в защитный кейс. В нижней части установлена основная плата рис. 9 с АЦП, над платой на DIN рейке установлены магнитные пускатели КМ1, КМ2, КМ3.

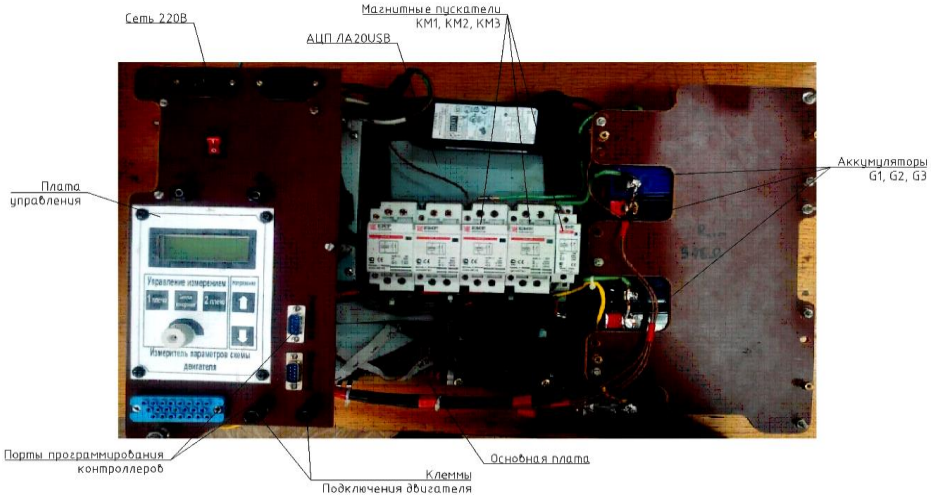


Рис. 7. Основные узлы измерителя (ноутбук не показан)

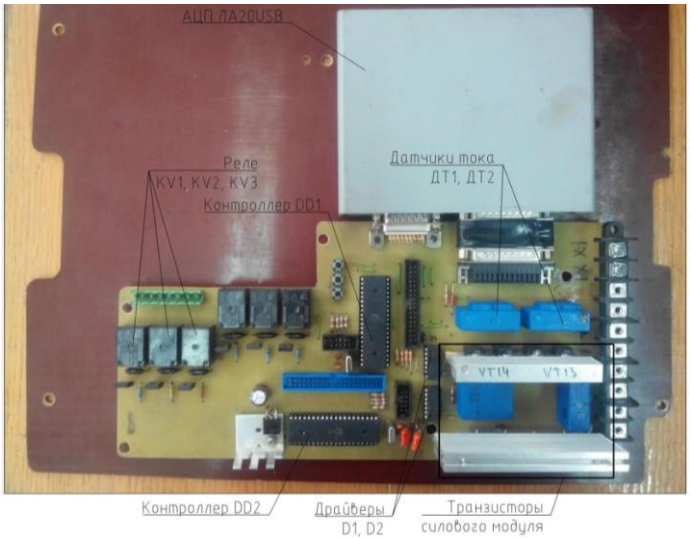


Рис. 8. Внешний вид основной платы

Аккумуляторные батареи и блок питания установлены по краям от основной платы, на которых закреплена ниша для установки ноутбука.

IV. Метрологические характеристики мобильной установки

Метрологические характеристики мобильной установки в диапазоне токов от 1А до 15А, включая показатели точности [2]:

Внутреннее сопротивление установки от 10,0 до 11,1 мОм.

Пределы допускаемой относительной погрешности снятия и регистрации переходного процесса затухания тока, %, не более:

в диапазоне токов от 15А до 1А – 2

в диапазоне токов от 1А до 0,1А – 6

при длительности переходного процесса затухания тока, с 0,07

Предел допускаемой относительной погрешности поддержания установленного тока I_0 в циклах измерения, %, не более 1.

V. Выводы и заключение

Мобильная установка способна достоверно регистрировать в электротехнических объектах с индуктивной реакцией переходные процессы затухания тока в диапазоне от 1А до 15А с относительной погрешностью не более 2% и в диапазоне тока от 1А до 0,1А с относительной погрешностью не более 6% при длительности переходных процессов от 0,07 с. Мобильная установка позволяет осуществить определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения [3].

Список литературы

1. Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. С. 162.

2. АТТЕСТАТ № 0573. Мобильная установка регистрации переходных характеристик в электротехнических объектах РПХ-20. Выдан 09.10.2014 / РОССТАНДАРТ. ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Омской области».

3. Ковалев В. З., Хамитов Р. Н., Кузнецов Е. М., Аникин В. В., Бессонов В. О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 36–40.

УДК 621.313

ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ДИАГНОСТИКА

П. В. Беляев, А. П. Головский

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе рассмотрены основные виды повреждений обмоток статора асинхронных двигателей, способы диагностики неисправностей в зависимости от вида повреждения. Показано, какие методы диагностики являются распространёнными, выявлены недостатки существующих методов.**

Ключевые слова: неисправности статора асинхронных двигателей, методы обнаружения неисправностей асинхронных двигателей, современные методы диагностики неисправностей.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-33-37

I. Введение

В процессе эксплуатации в электротехнических комплексах и системах асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором зарекомендовали себя надежными, износостойкими, экономически обоснованным элементом привода для механизмов участвующих в производственном цикле. Доля асинхронных двигателей составляет не менее 80 % двигателей во всех видах используемых приводов [1].

В процессе эксплуатации, по различным причинам, асинхронные двигатели ухудшают свои технические характеристики. Статистические данные показывают, что в 75–95 % случаев отказ в работе асинхронных двигателей мощностью более 5 МВт происходит из-за повреждения обмоток статора и ротора, что приводит к простою оборудования, недоотпуску продукции и снижению эффективности работы механизмов.

Поэтому своевременное выявление места и степени повреждений позволит избежать их развития, уменьшить время восстановления, сократить затраты на обслуживание, избежать простоев оборудования, повысить эффективность работы двигателей и производственных механизмов.

II. Постановка задачи

В практике использования асинхронных двигателей существенное значение имеет повышенная износостойкость, простота эксплуатации и более низкая стоимость при сопоставлении их с другими типами двигателей.

Основными причинами и источниками возникновения и развития повреждений асинхронного двигателя являются [2]:

- перегрузка или перегрев статора электродвигателя – 31 %;
- межвитковое замыкание – 15 %;
- повреждения подшипников – 12 %;
- повреждение обмоток статора или изоляции – 11 %;
- неравномерный воздушный зазор между статором и ротором – 9 %;
- работа электродвигателя на двух фазах – 8 %;
- обрыв или ослабление крепления стержней в беличьей клетке – 5 %;
- ослабление крепления обмоток статора – 4 %;
- дисбаланс ротора электродвигателя – 3 %;
- несоосность валов – 2%.

Неисправность обмотки статора или ухудшение ее технических характеристик является весьма значимой проблемой не только аварийной ситуации, выхода из строя, но и эксплуатации асинхронных двигателей. Кроме того, это имеет существенное значение при разработке мероприятий по увеличению срока службы приводов в электротехнических комплексах и системах.

Выделим несколько возможных дефектов возникающих в статоре электродвигателей: межвитковые замыкания, межкатушечные замыкания, межфазные замыкания, замыкания на землю и обрыв цепи.

III. Теория

Неисправности в обмотках статора появляются в основном из-за короткого замыкания обмотки, вызванные нарушением изоляции. Обмотка статора состоит из катушек изолированной медной проволоки, размещенной в пазах статора.

Дефекты в обмотках статора часто вызваны разрушением изоляции между двумя соседними витками в катушке. Это называется межвитковое короткое замыкание как показано на рис. 1. Результирующие индуцированные токи создают дополнительный нагрев и вызывают дисбаланс в магнитном поле в машины. Если неисправность не будет своевременно выявлена и как-то локализована, местный нагрев приведет к дальнейшему повреждению изоляции обмотки статора, ее разрушению и, в конечном итоге, приведет к выходу двигателя из строя. Несбалансированное магнитное поле может также привести к чрезмерной вибрации, которая может вызвать преждевременные неисправности подшипников [3].

Графическое представление неисправностей статора показано на рис. 1.

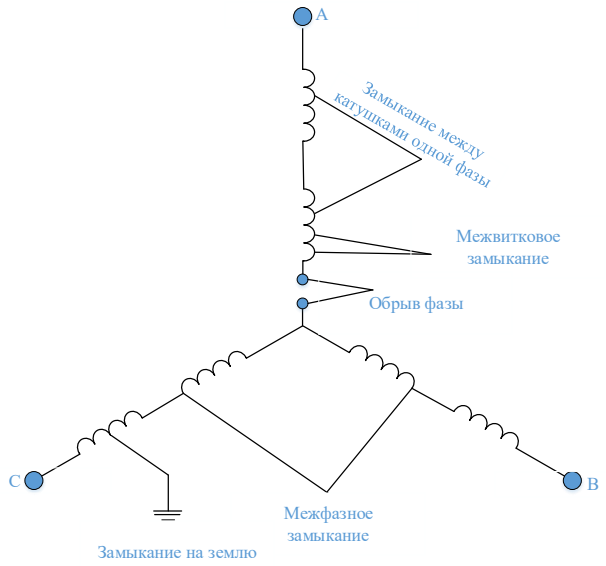


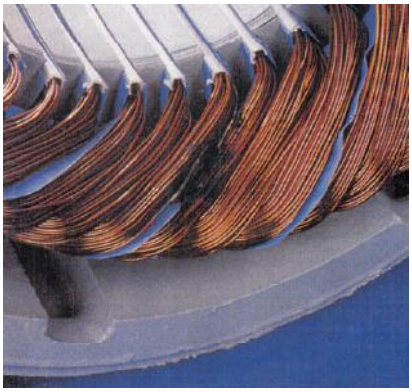
Рис. 1. Виды повреждений обмотки статора асинхронного двигателя

В настоящее время большой интерес представляет мониторинг состояния электродвигателя в процессе его работы под нагрузкой. Следовательно, должны быть разработаны методы и критерии диагностики и оценки его состояния и использования.

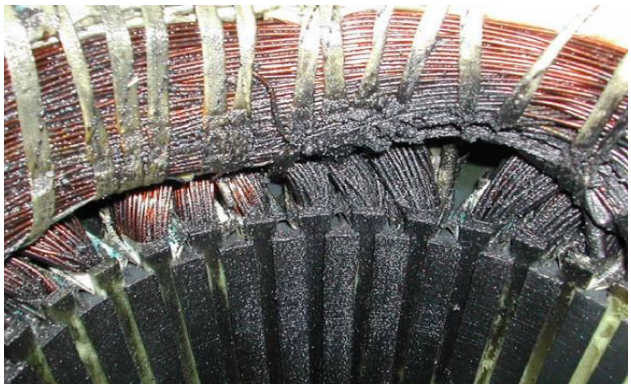
Наиболее распространенные методы диагностики неисправностей в статоре асинхронного двигателя:

1. контроль напряжения и тока статора;
2. контроль магнитного потока;
3. температурный контроль;
4. контроль сопротивления изоляции.

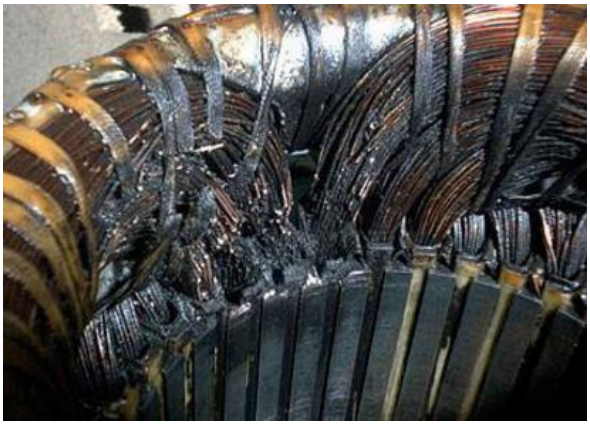
На рис. 2 представлены физические результаты замыканий обмоток статора:



а) – междувитковое короткое замыкание



б) – перегрев обмотки статора



в) – обрыв одной фазы обмотки статора

Рис. 2. Виды повреждений обмоток статора

IV. Результаты экспериментов

Для оценки технического состояния асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором широкое распространение получил метод контроля напряжения и тока статора и их симметричных составляющих. В этом методе теоретически хорошо обоснованы параметры, критерии, показатели и легко доступны измерения.

Недостаток метода – результаты, получаемые в процессе измерений, носят обобщенный характер и не могут служить основой для локализации места повреждения или неисправности. Для более точной диагностики требуется выводить двигатель из технологического процесса, проводить его демонтаж, последующую разборку и ремонт.

Метод, основанный на контроле магнитного потока асинхронного двигателя. Любые искажения в магнитном потоке воздушного зазора, из-за дефекта статора, изменяют магнитную характеристику электродвигателя. Осевой магнитный поток асинхронного двигателя легко измеряется с помощью круговой поисковой катушки, которая помещается в торце машины. Катушка поиска измеряет выходное напряжение, которое пропорционально скорости изменения осевого потока утечки. Этот сигнал содержит множество частотных составляющих, которые присутствуют в токе статора.

Недостатки метода – применение данного метода ограничивается необходимостью использования дорогостоящих приборов и связанного с ними оборудования.

Метод контроля температуры двигателей может быть реализован путем измерения локальной температуры двигателя, его деталей конструкции и оценки параметров.

При возникновении коротких замыканий в обмотке статора значение тока будет значительным или даже высоким, следовательно, будет выделяться чрезмерное тепло в деталях конструкции и, если не будут своевременно предприняты надлежащие действия, двигатель выйдет из строя.

Недостатки: данный метод не может быть применен для выявления механических неисправностей асинхронных двигателей, по причине невозможности определения дефекта без остановки и последующего разбора двигателя.

Метод основан на контроле сопротивления изоляции обмоток. До недавнего времени требовалось выводить двигатель в ремонт для проведения замера сопротивления изоляции мегомметром.

В настоящее время разработана методика диагностики сопротивления изоляции методом волновых затухающих колебаний (ВЗК), позволяющая проводить измерения на работающем двигателе [4]. Данный метод, является одним из наиболее достоверных и точных методов, позволяющих определить реальное состояние изоляции обмоток электродвигателей. Его сущность заключается в том, что на диагностируемую обмотку подается типовой единичный сигнал, в результате чего в данной обмотке возникает переходный процесс, зависящий от ее параметров, и отслеживается степень затухания переходного процесса в обмотке по амплитуде и периоду сигнала на выходе. Чем хуже состояние изоляции, тем сильнее затухает сигнал. Основным достоинством данного метода является то, что он позволяет производить оценку состояния междувитковой изоляции.

Недостатком метода, является необходимость подключения переносного прибора типа ОМЕГА-3К-01, для снятия показаний. Существующие приборы не получили широкого распространения и не выпускаются серийно.

V. Обсуждение результатов

Увеличение срока службы асинхронных двигателей является важным вопросом, связанным со снижением аварийности в электротехнических комплексах и системах, увеличением срока эксплуатации, повышением технико-экономических показателей.

Разработка точных методов контроля состояния асинхронного двигателя может повысить надежность и уменьшить эксплуатационные расходы.

Своевременное выявление неисправностей асинхронных двигателей приводит к увеличению их жизненного цикла, и может выявлять дефекты на вновь вводимых в производственный процесс после ремонта двигателях.

Описываемые методы возможно применять при входном контроле.

VI. Выводы и заключение

Методы обнаружения повреждений в обмотках статора асинхронных двигателей, имеют свои достоинства и недостатки.

Метод контроля тока и напряжения является самым распространенным методом, при этом не может дать окончательный вывод о месте и причинах повреждения. Метод контроля магнитного потока не получил широкого распространения на сегодняшний день, но при этом является широко изучаемым. Метод теплового контроля служит для определения уже произошедшего повреждения в обмотке статора. Метод непрерывного кон-

троля изоляции является самым эффективным из применяемых методов и может давать прогностические рекомендации о предстоящем повреждении обмотки статора.

Рассмотрев существующие методы можно сделать вывод о необходимости разработки новых методов диагностики повреждений асинхронных двигателей, и усовершенствования существующих методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости Электротехники. 2005. № 1 (31). С. 23–28.

2. Неисправности асинхронного электродвигателя. URL: http://www.malahit-irk.ru (дата обращения: 15.03.2019).

3. Frosini and E. Bassi. Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motor // Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, no. 10. P. 201–209.

4. Хомутов С. О., Тонких Ю. А., Дронов В. С. Новые методы и технические средства диагностики электродвигателей в агропромышленном комплексе // Ползуновский вестник. 2009. № 4. С. 109–115.

УДК 621.316.3

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Я. Бигун, Е. П. Жиленко, Е. В. Петрова, Л. В. Владимиров, А. Е. Обвинцев, В. Н. Мазко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В связи с постоянно растущим спросом на электроэнергию, поставщики электроэнергии сталкиваются с проблемой ограниченности пропускной способности воздушных линий электроэнергетических систем. Строительство новых линий, замена проводов на провода с большим поперечным сечением, замена действующих линий на линии с более высоким классом напряжения может решить эту проблему. Указанные направления не всегда реализуемы из-за экономических, социальных и других особенностей. Максимальный ток, передаваемый по линиям электропередачи, как правило, рассчитывается для наихудших условий эксплуатации. В реальных условиях эксплуатации допустимая токовая нагрузка линии может динамически изменяться в зависимости от условий окружающей среды. Наиболее важно знать реальную температуру проводов воздушных линий для определения максимальной пропускной способности линий электропередачи. В данной работе проведен краткий анализ различных систем и устройств мониторинга для определения параметров, влияющих на максимально допустимый ток линий.**

Ключевые слова: температура провода, системы мониторинга, пропускная способность, погодные параметры.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-37-40

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сроки эксплуатации воздушных линий электропередач (ВЛ) часто превышают нормативные и составляют от 40 лет и более, поэтому остро стоит проблема своевременного контроля за их состоянием. Кроме того, на остаточном сроке службы сказывается и воздействие внешних факторов окружающей среды в сочетании с эксплуатационными нагрузками. Большинство воздушных линий электропередачи на данный момент не оборудованы системами мониторинга, поэтому контроль за метеорологическими воздействиями ведется визуальным способом выездными бригадами служб сетевых районов, а передача полученной ориентировочной информации происходит имеющимися средствам связи [1–4]. В результате развития экономики растёт потребление электроэнергии [5–7], а активное развитие и внедрение устройств малой генерации ещё сильнее увеличивает нагрузку на распределительные сети, которые эксплуатируются длительное время. Данные факторы влияют на надёжность электроснабжения, увеличивается вероятность перегрева проводов воздушных линий электропередачи [6–8].

Проблема повышения пропускной способности решается путём строительства новых линий электропередачи, заменой проводов на провода с большими сечениями, заменой устаревшего оборудования, увеличением напряжения воздушных линий. Пропускная способность действующих линий, как правило, определяется на

основании максимально допустимой температуры с учётом наихудших условий для охлаждения провода [7–9]. На практике такие погодные условия встречаются достаточно редко. Эксплуатация электрических сетей при условиях указанных выше обуславливает снижение реальной потенциальной загрузки линий электропередачи. Учет реальной температуры линий электропередачи позволит максимально увеличить пропускную способность линий электропередачи в условиях конкретных значений климатических факторов [11, 13].

II. Постановка задачи

Для повышения пропускной способности необходимо внедрять в распределительные сети системы мониторинга линий электропередачи. Использование данных систем, направленных на повышение надежности передачи электроэнергии от источника до потребителя позволит эффективно эксплуатировать распределительные сети электроэнергетических систем [5–9]. Применяемые в настоящее время системы мониторинга обеспечивают измерение температуры провода, температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, интенсивность солнечного излучения. Информация от систем мониторинга позволяет уменьшить ошибку прогнозирования нагрузки и повысить пропускную способность линий электропередачи [13]. Наиболее подробно в данной работе рассмотрены отечественные устройства определения температуры проводов воздушных линий.

III. Отечественные устройства определения температуры провода воздушных линий

Отечественные устройства контроля параметров воздушных линий электропередач на данный момент представлены стационарными системами, состоящими из датчиков, установленных в начале и в конце линии, параметры которых передаются в системы сбора данных, где происходит дальнейшая обработка полученной информации при помощи различных математических моделей для выдачи управляющих решений [7–10].

Среди устройств контроля температуры провода рассмотрены: датчик «WTS» системы «WDM-T» производства «Димрус», устройство контроля температуры провода автоматизированной информационной системы контроля гололёдной нагрузки (УКТП АИСКГН) производства «БЛАЙС», модуль системы ASTROSE производства «Совтест», модуль измерения температуры провода МИГ-ДТПК5 производства «МИГ». Сравнение данных устройств представлено в табл. 1.

Система ASTROSE предлагает всестороннюю информативную техническую платформу для измерения различных параметров и образует самоорганизующуюся сеть беспроводной передачи данных [12]. Сенсоры данной системы весьма удобны для монтажа на ЛЭП.

Особенностью системы «МИГ» является определение момента начала образования отложений гололеда, вида и массы, интенсивности нарастания гололёда, прогнозирование гололедообразования за 2–3 часа до его начала, контроль температуры провода при плавках, система также выдаёт рекомендации по выбору схемы и составлению оптимальной карты плавки [11, 13].

Система «WDM-T» предлагает дистанционный контроль температуры проводов ЛЭП, ограничителей напряжений, концевых и соединительных муфт, измерительных трансформаторов тока и напряжения [14].

Система АИСКГН «БЛАЙС» может использоваться для построения информационных систем на опорах ВЛ 10–500 кВ с возможностью отображения данных на неограниченном количестве рабочих мест. Система АИСКГН «БЛАЙС» является лидером среди подобных систем по количеству установленных пунктов и площади покрываемой территории [15–16].

ТАБЛИЦА 1
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДА

№	Название	Краткое описание устройства
1	«WTS» (Система «WDM-T»)	Автономный датчик контроля температуры марки «WTS» монтируется на проводах ЛЭП и входит в систему «WDM-T», которая состоит из 3-х и более датчиков «WTS» и одного блока-приёмника. Устройство «WTS» предназначено для дистанционного измерения температуры оборудования, для которого невозможно использовать проводные датчики измерения температуры с соединительными кабелями. Измеряемая температура: -50 ÷ 150 °C; Точность измерения: ± 1 °C; Время между замерами: 5 мин; Диапазон рабочих температур: -40 ÷ 85 °C.

2	УКТП (Система АИСКГН «БЛАЙС»)	Устройство контроля температуры провода (УКТП) предназначено для точечного контроля температуры фазного провода или грозозащитного троса воздушной линии электропередачи 10 – 500 кВ. Особенностью УКТП является возможность контролировать температуру воздуха вблизи провода (троса). УКТП может использоваться: – в составе пункта контроля системы АИСКГН «БЛАЙС»; – как автономное устройство с возможностью отображения данных на неограниченном количестве диспетчерских терминалов. Диапазон контролируемой температуры провода: -55 ÷ 125 °С; Точность измерения: ±1.5 °С; Диапазон контролируемой температуры воздуха: -40 ÷ 55 °С;
3	Модуль системы ASTROSE	Модули системы ASTROSE устанавливается непосредственно на проводах преимущественно около траверса опор в пределах одного пролёта на расстоянии 500 м друг от друга. Модуль производит измерения непосредственно на месте установки и питается за счет электромагнитного поля высоковольтного провода посредством токового трансформатора. Система ASTROSE открыта для интегрирования различных датчиков: – определения замыкания на землю; – контроля удара молнии; – определения солнечной радиации; – мониторинга влажности и температуры среды, окружающей ВЛ. Система ASTROSE контролирует следующие параметры: –температуру провода (троса); – угол провиса провода; – действующее значение тока; – вибрационные характеристики провода. Основные характеристики температурного датчика модуля системы ASTROSE: – Максимальная измеряемая температура – 100 °С. – Минимальная измеряемая температура – -25 °С. - Разрешающая способность – 0,1 °С.
4	Модуль измерения температуры фазного провода МИГ-ДТПК5 (Система «МИГ»)	Модуль измерения температуры фазного провода МИГ-ДТПК5 входит в систему мониторинга интенсивности гололёдообразования (система МИГ) и осуществляет контроль температуры проводника. В систему МИГ также входят: – модуль измерения метеоданных, состоящий из датчика температуры и влажности воздуха, датчика скорости ветра, датчика направления ветра; – модуль измерения тяжения подвески, состоящий из тензометрического датчика. Основные характеристики МИГ-ДТПК5: – Кратковременный перегрев фазных проводов – до 170 °С. – Рабочая температура фазных проводов – до 120 °С. – Точность измерения: ±0.5 °С.

VI. Заключение

Применение датчиков и модулей контроля температуры проводов воздушных линии в совокупности с датчиками наклона провода линии электропередачи, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра в автоматизированных информационных системах позволяет повысить надежность и эффективность работы электрических сетей, а так же производить экономически выгодную передачу электрической энергии.

Список литературы

1. Ромодин А. В., Борисов М. С. Система мониторинга воздушных линий электропередачи // Успехи современной науки и образования. 2017. Т. 1, № 1. С. 60–63.
2. Панасенко М. В. Аналитический обзор способов и устройств мониторинга промежуточного пролета воздушной линии электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11-4. С. 572–576.

3. Панасенко М. В. Устройство для измерения гололёдной и ветровой нагрузок на провода и тросы воздушных линий электропередачи // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 117.

4. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.

5. Вырва А. А., Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петров А. С., Петрова Е. В., Тевс В. В. Уточнение формул для анализа температуры проводов в задачах расчета потерь электрической энергии // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 120–126.

6. Петрова Е. В., Горюнов В. Н., Кириченко Н. В., Бигун А. Я., Христич Д. Е. Алгоритм расчета потерь в изолированных проводах линий электропередачи с учетом температуры токопроводящих жил // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 2. С. 306–308.

7. Шведов Г. В., Щепотин А. С. Анализ погрешностей расчетов нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 75–85.

8. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A., Petrova E.V., Bigun A.Y. Mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering 16. 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.

9. Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Кузнецов Е. А., Петрова Е. В. Анализ погрешностей расчета температуры и потерь мощности по базовому и приближенному уравнениям теплового баланса воздушных линий электропередач // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 210.

10. Morrow D. J., Fu J., Abdelkader S. M. Experimentally validated partial least squares model for dynamic line rating // IET Renewable Power Generation, April 2014. Vol. 8, no. 3. P. 260–268.

11. Girshin S. S., Bigun A. Y. and Petrova E. V. Analysis of dynamic thermal rating of overhead power lines in the conditions of forced convection considering non-linearity of heat transfer processes // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911434.

12. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бигун А. Я. Расчет нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 287.

13. Nguyen Huu-Minh, Lilien Jean-Louis, Schell Peter. Dynamic line rating and ampacity forecasting as the keys to optimise power line assets with the integration of res. The European project Twenties Demonstration inside Central Western Europe // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED. 2013. P. 1–5.

14. Скрябина А. В. Современные системы мониторинга ЛЭП и энергооборудования // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы всеросс. науч.-метод. конф. 01–03 февр. 2017 г. / Оренбургский государственный университет. Оренбург, 2017. С. 525–527.

15. Сацук Е. И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дис. … д-ра тех. наук. Новочеркасск, 2011. 314 с.

16. Панасенко М. В., Брыкин Д. А. Обзор используемых устройств обнаружения отложений для систем мониторинга воздушных линий электропередачи // Воздушные линии. 2012. № 3. С. 79–82.

17. Механошин Б. И., Шкапцов В. А. Система мониторинга состояния воздушных линий электропередачи // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 6. С. 33–8.

18. Сухоруков С. И. Автоматизированная система удаления льда с проводов лэп: дис. … к-та тех. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2016. 220 с.

19. Самарин А., Рыгалин Д., Шкляев А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей // Естественные и технические науки. 2012. № 1, 2.

20. Титов Д. Е. Мониторинг гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. к-та тех. наук. Саратов, 2014. 151 с.

21. Автоматизированная система обнаружения гололёда на ВЛ ASTROSE. 21с.URL: https://sovtest-ate.com/pdf/ASTROSE.pdf (дата обращения 06.03.2019).

22. Система мониторинга интенсивности гололёдообразования (система МИГ). URL: http://migsystem.ru/#project (дата обращения 06.03.2019).

23. WDM-T – система контроля температуры проводов ЛЭП. URL: https://dimrus.ru/wdmt.html (дата обращения 06.03.2019).

24. Принцип построения системы мониторинга АИСКГН «БЛАЙС». URL: http://blice.ru/sys_build (дата обращения 06.03.2019).

25. Средства диагностики и предотвращения снегоналипания и гололёдообразования на воздушных линиях 6-150 кВ. СПб.: Межрегиональная распределительная сетевая компания Северо-Запада. Корпоративный презентационный день. 50 с. URL: http://www.mrsksevzap.ru/cs/Satellite?-blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadername2=MDT-Type&blobheadervalue1=inline%3B+filename%3DKatalog_KPD_31_oktiabria_2017.pdf&blobheadervalue2=abinary%3B+charset%3DUTF-8&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1384345749994&ssbinary=true (дата обращения 06.03.2019).

УДК 621.311

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. Бубенчиков, Г. Ю. Киселев, Т. В. Бубенчикова, Е. А. Манакова, Н. А. Терещенко,
В. И. Беляев, М. А. Голованов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной статье приведён обзор на различные типы современных генераторов для ветроэлектрических установок (ВЭУ), которые являются наиболее эффективными, надежными и имеют относительно невысокую стоимость, что является альтернативой ныне используемым генераторам в сфере ветроэнергетики.**

Ключевые слова: генератор, ветроэнергетическая система, типы, ВЭУ.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-41-52

I. Введение

В настоящее время, в сфере электроэнергетики большую роль играет энергетика, основанная на возобновляемых источниках энергии. Одной из таких отраслей является ветроэнергетика. Ввиду стремительного развития данной отрасли, с точки зрения конструктивного исполнения и анализа работы механизмов, современные ветрогенераторы нуждаются в некоторых усовершенствованиях и нововведениях.

В данной статье приведён обзор на различные типы современных генераторов для ветроэлектрических установок (ВЭУ), которые являются наиболее эффективными, надежными и имеют относительно невысокую стоимость, что является альтернативой ныне используемым генераторам в сфере ветроэнергетики.

В России внедрению и эксплуатации ветроэнергетических установок уделяется меньшее внимание, чем за рубежом. Причинами этого являются всё еще недостаточно высокие цены на электроэнергию в Российской Федерации, а также отсутствие инвестиций, чего нельзя сказать о ряде других стран с похожими геоклиматическими условиями, такими как: Канада, Дания, Германия, США и другие. К примеру, в Германии, за счёт больших инвестиций, по итогам 2012 года общая мощность ветрогенераторов составила 31,3 ГВт [11], а уже к 2018 году данный показатель превысил 56 ГВт [11], что является колоссальными цифрами. В среднем прирост мощности ветроустановок составил 4 ГВт в год.

II. Постановка задачи

В настоящее время одной из проблем широкого распространения возобновляемых источников энергии, а в частности ветровой энергии, является контроль частоты. Контроль частоты является одним из самых важных вопросов в энергосистемах. Отклонение частоты от нормальной (50±0,2 Гц) ведет к: нарушению режима работы электростанций; снижению производительности механизмов на промышленных предприятиях; снижению КПД основных агрегатов электростанций, что ведет к увеличению потерь в сетях, а также все потребители переменного тока работают на частоте 50 Гц [12].

Контроль частоты усложняется широким распространением электроустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии, а в частности ветроустановок. Из-за того, что воздействие ветра на лопасти ветрогенератора непостоянно, образуется временная нестабильность и некоторое отклонение частоты энергосистемы. В качестве решения данной проблемы предлагается воспользоваться методом практического добавления виртуального синхронного генератора с цилиндрическим ротором [1].

Данный синхронный генератор играет роль некоторого «хранилища энергии». При дефиците мощности, что часто бывает при выработки энергии с помощью возобновляемых источников энергии, происходит снижение частоты вращения генератора, а следствием этого снижение частоты подаваемой в сеть. В этом случае виртуальный синхронный генератор, выполняет вторичную роль, он является резервом мощности при колебаниях мощности в основном генераторе и поддерживает определенную установленную мощность (рис. 1).

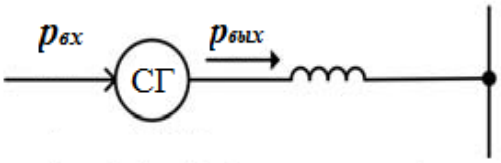


Рис. 1. Модель виртуального синхронного генератора (ВСГ)
с входной и выходной мощностями и длинной линии

В ходе исследования были построены зависимости колебания частоты от времени, с присутствием виртуального синхронного генератора в системе и без (рис. 2).

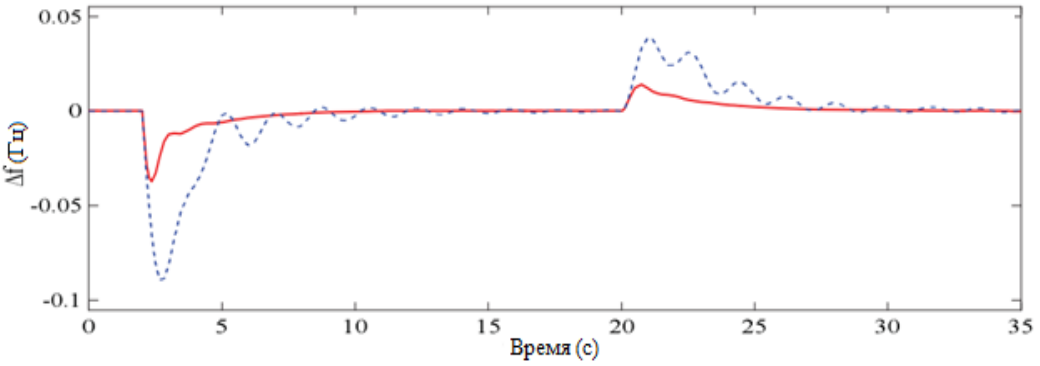


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний от времени: красная линия – без синхронного генератора, синяя пунктирная линия – с синхронным генератором

Результаты моделирования показывают высокую эффективность предлагаемого метода. Виртуальный синхронный генератор с ёмкостью хранения энергии, не полностью убирает колебания, но значительно смягчает отклонения частоты при изменении силы ветра [1].

Ещё одним важным показателем электроэнергии является постоянство выходного напряжения. При ныне используемых асинхронных генераторах в ветровых турбинах, за счет непостоянства силы ветра, происходят значительные колебания напряжения, что является проблемой в сфере выработки электроэнергии [2].

Рассмотрим некоторую предлагаемую систему по контролю выходного напряжения (рис. 3). Вся суть предлагаемой системы заключается в том, чтобы вставить инвертор с широтно-импульсной модуляцией (PWM) между самовозбуждающимся асинхронным генератором (SEIG) и трёхфазной нагрузкой переменного тока, тем самым контролируя значение выходного напряжения при изменении нагрузки или скорости ветра. Таким образом, инвертер будет производить контроль выходного среднеквадратичного напряжения и индукции самовозбуждения [2].

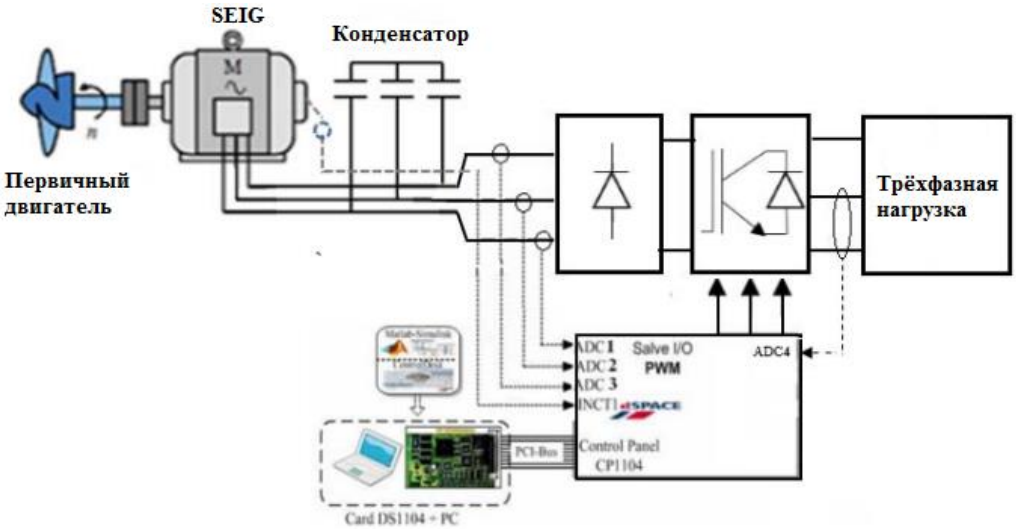


Рис. 3. Схема предлагаемой системы

Эта установка очень перспективна и эффективна в области возобновляемых источников энергии в отдаленных районах, где сила ветра непостоянна из-за сложных географических условий. Это все позволяет снизить затраты на сооружение сложных установок по поддержанию постоянства напряжения, а также поднять эффективность вырабатываемой энергии [2].

Проведя некоторые опыты, при подключении генератора к изолированной нагрузке, было экспериментально подтверждено, что, несмотря на изменение скорости ветра или нагрузки при использовании самовозбуждающегося асинхронного генератора с инвертором, содержащим широтно-импульсную модуляцию, значения напряжения практически постоянны [2].

Рассмотрим ещё одну установку позволяющую поддерживать заданные параметры частоты и напряжения. Автономная система преобразования энергии ветра на основе индукционного генератора двойного питания (DFIG). Данная система состоит из ветровой турбины, генератора и аккумуляторной системы (рис. 4) [3].

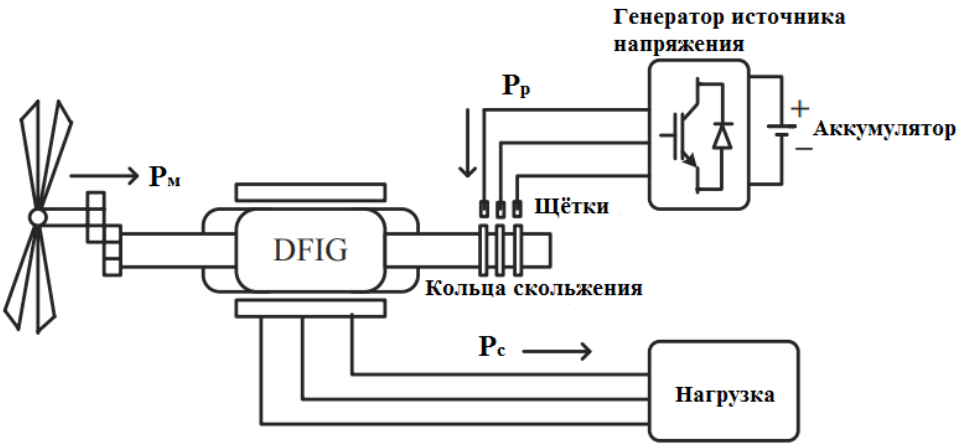


Рис. 4. Схематическая модель системы преобразования энергии ветра

Аккумуляторная система хранения энергии требуется для подачи мощности во время неблагоприятных условий, т.е. при снижении силы ветра либо вовсе при отсутствии. А в нормальном режиме ветряной турбины, через генератор происходит зарядка аккумуляторной системы. Таким образом, происходит поддержание стабильности электроэнергии.

При помощи программных обеспечений MATLAB/Simulink была смоделирована автономная система на основе генератора двойного питания. Для моделирования использовалась машина мощностью 7,5 кВт [3]. Целью моделирования была оценка подходящего положения ротора. Результатами моделирования указывают на то, что система может поддерживать активные и реактивные мощности нагрузки. Условия устойчивого состояния системы получены в течение 0,3 с. (рис. 5) [3].

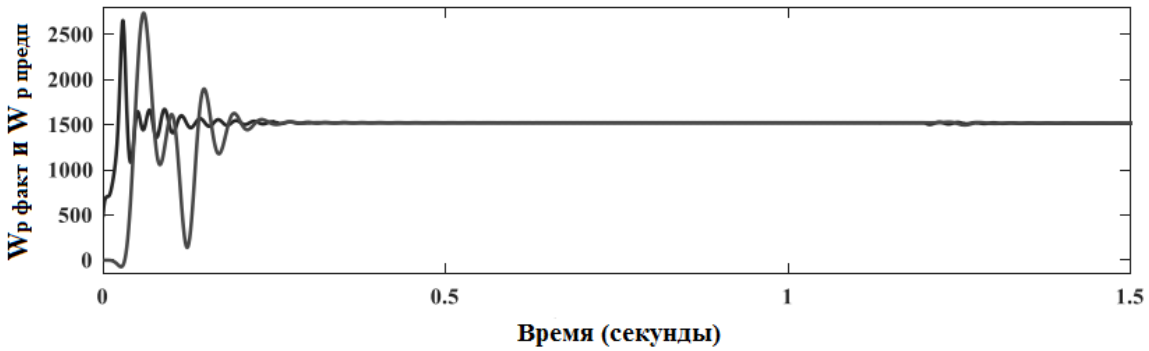


Рис. 5. График фактической и предполагаемой скоростей

Технология управления способна поддерживать постоянное напряжение и частоту статора во время пускового и установившегося состояний системы [3].

Мы рассмотрели некоторые аналитические решения проблем связанные с контролем частоты и напряжения.

III. Теория

Рассмотрим некоторые вариации конструктивных решений для ветрогенераторов, которые позволят повысить эффективность и надежность ветровых установок, а также относительно снизить стоимость проектируемых агрегатов.

1) Тенденция снижения стоимости морской ветряной энергии заключается в разработке крупных ветряных турбин. Турбины с мощностями 6–8 МВт уже наблюдались на рынке ветроэнергетики. Для повышения эффективности ветряных турбин предлагается использовать сверхпроводящий генератор постоянного тока [4]. Из-за высокой токопроводящей способности и отсутствия потерь постоянного тока сверхпроводников, может

быть достигнуто превосходное соотношение мощности к весу (объему) сверхпроводящего генератора [4]. На рис. 6 представлен трехмерный вид модели сверхпроводящего генератора.

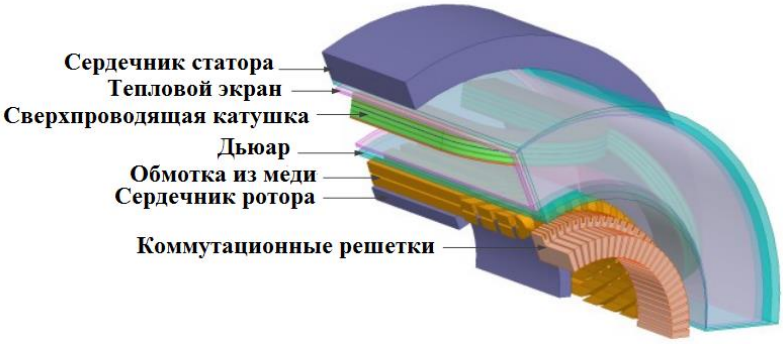


Рис. 6. Трехмерный вид модели сверхпроводящего генератора (без щёток)

В этом генераторе сверхпроводящие катушки используются в основном для генерации основной плотности потока воздушного зазора, а стальные сердечники из кремниевой стали используются статором и ротором (рис. 7). Для изучения возможности предлагаемого генератора и его проектирования измеряют критический ток сверхпроводящего материала и электромагнитные свойства железной стали кремния, из которой состоит сердечник. В качестве предварительного шага к модели было проведено испытание ключевого компонента модели – сверхпроводящей катушки [4].

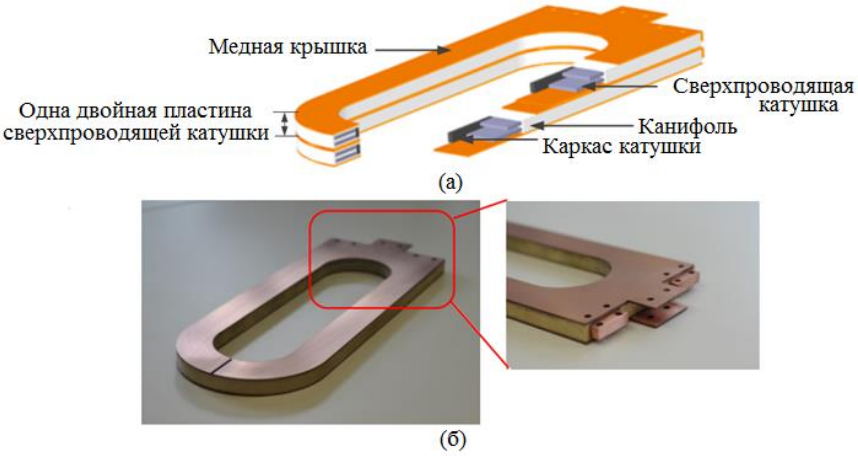


Рис. 7. Структура (а) и Фото одной двойной пластины сверхпроводящей катушки (б)

2) Потенциал энергии ветра (6 Вт/м2) в местах глубокого введения в открытое море значительно выше, чем на земельных участках (1,5 Вт/м2) [5]. Ветряные турбины, значительно удаленные от берега, в прошлом крепились лишь к морскому дну. Данная технология позволяет устанавливать турбины лишь до глубины морского дня 30–50 м, из-за финансовых и технических ограничений. В данной статье рассмотрим некоторые предлагаемые различные способы разработки и установки ветряных электростанций в открытом море. Будущее – это перемещение ветропарков все дальше и дальше от берега, а также для того, чтобы навсегда снизить затраты на развертывание, эксплуатацию и техническое обслуживание. Первая в мире плавучая ветряная электростанция Hywind Scotland Pilot Park, начала производство электроэнергии в октябре 2017 года. Парк имеет пять 6 МВт плавающих ветряных турбин, слабо привязанный к морскому дну в 25 км от побережья [5].

Уже существуют многообещающие технологии конверсии энергии ветра, направленные на решение различных экологических и инженерных задач, и поиск новых инвесторов. Среди них также есть подходы, совместно использующие как ветровые, так и волновые ресурсы, поскольку на Земле имеется много областей с комбинированными (ветряными и волновыми) энергетическими потенциалами. В статье представлен интересный подход, основанный на общем преобразовании энергии для двух энергоресурсов на основе роторно-линейного генератора (РЛГ) [5].

Данное сочетание двух энергоресурсов имеет несколько преимуществ, в основном связанных с экономической точкой зрения. Преимущества синергии между оффшорным преобразованием энергии ветра и волн:

увеличение сбора энергии на единицу массива; предсказуемость из-за более высокой предсказуемости энергии волн; а также использование общей плавающей опоры (швартовки).

На (рис. 8а) показана концепция, состоящая из лонжерона поддерживающего раннее известную плавающую ветряную турбину и осесимметричный тор, который вздымается вдоль лонжерона, чтобы извлечь энергию из волн через гидравлическую систему отбора мощности [5].

На (рис. 8б) представлена концепция, состоящая из полупогруженной плавучей платформы с четырьмя колоннами. Центральная главная колонна, которая содержит ветряную турбину (ВТ), подключается к трем боковым колоннам через понтоны, имеющие закрылки вращающегося типа, навешанные на них. Энергия волн собирается с помощью жестких структурных рычагов и линейного механизма отбора мощности [5].

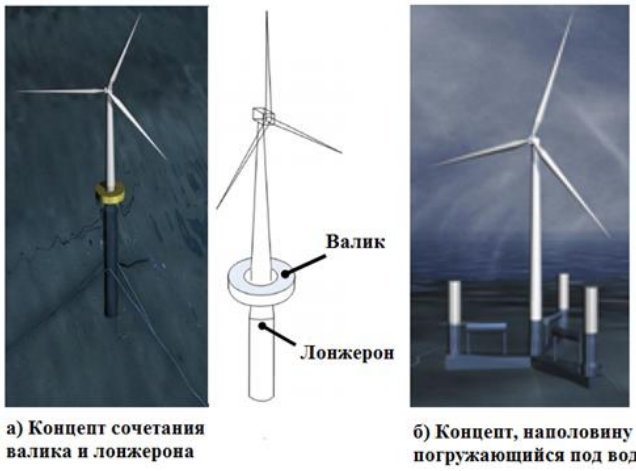


Рис. 8. Два концепта гибридных ветро-волновых преобразователей энергии (ГВВПЭ)

На (рис. 9) представлена ещё одна концепция гибридного энергетического преобразователя, основанного на энергии ветра и энергии волн (ГВВПЭ).

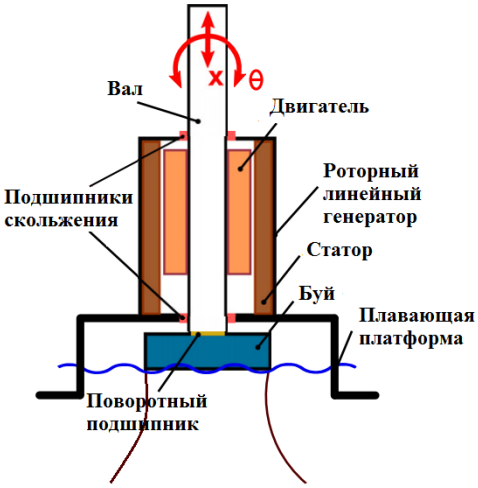


Рис. 9. Предлагаемый гибридный ветро-волновой преобразователь энергии (ГВВПЭ) с вращательно-поступательным генератором (РЛГ)

Основная идея ГВВПЭ заключается в использовании одного роторно-линейного генератора (РЛГ) для сбора энергии ветра и волн. При размещении на плавучей платформе, требуется более легкая и упрощённая опорная конструкция. В нижней части вертикально-осевой ветровой турбины (ВОВТ) расположен статор РЛГ. Вал ВОВТ вращается на буе, поднимается и опускается на волнах, эти два движения и способствуют электродвижущей силе.

За счёт объединения в одной установки двух систем преобразования энергии значительно увеличивается эффективность установки.

Рассмотрим некоторые наиболее эффективные варианты исполнения роторно-линейных машин (РЛМ).

На (рис. 10) представлен вариант генератора интегрированного типа. Он состоит из одного пакета статора, имеющего два набора обмоток. Осевая обмотка (1) связанна с вращательным движением, а обмотка кольцевого типа (2) связанна с линейным движением. Обе обмотки расположены в стальном сердечнике статора (5) и корпусе (3). Внутри машины находится длинный цилиндрический ротор (4) – это сплошной цилиндр, покрытый двойным слоем железа и меди или ротор с поперечной перекладиной [5].

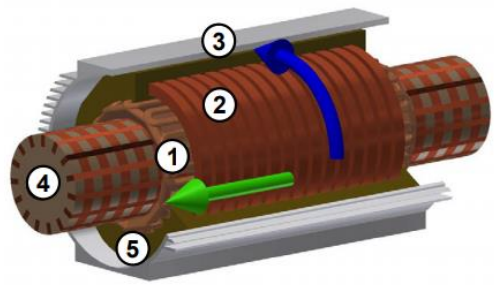


Рис. 10. Индукционная двухобмоточная роторно-линейная машина: 1) Осевая обмотка; 2) Обмотка кольцевого типа; 3) Корпус; 4) Длинный цилиндрический двигатель; 5) Стальной железный сердечник

Данная установка имеет высокую эффективность, за счет интегрированного типа генератора. Недостатком данной концепции генератора является то, что требуется внешняя реактивная мощность.

На (рис. 11) представлена роторно-линейная машина с постоянными магнитами и с чередующимися полюсами. Данные конструкции очень похожи со статорами бесщеточных двигателей постоянного тока. Трубчатый двигатель представляет собой полый цилиндр с ферромагнитным сердечником, по поверхности которого закреплены постоянные магниты, которые намагничены на радиальное направление. Чередования полюсов постоянных магнитов с выступами ферромагнитного сердечника (рис. 11) [5].

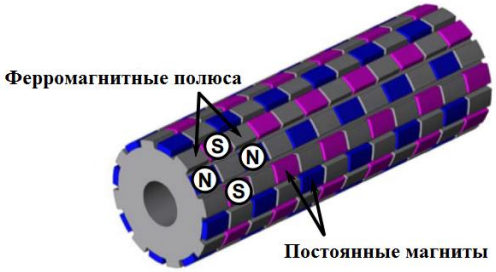


Рис. 11. Ротор роторно-линейной машины с постоянными магнитами с чередующимися полюсами

Еще один концепт роторно-линейного генератора – генератор с переменным сопротивлением (рис. 12). Машины с переменным сопротивлением имеют несколько преимуществ в основном за счет их простой конструкции (пассивный ротор) [5].

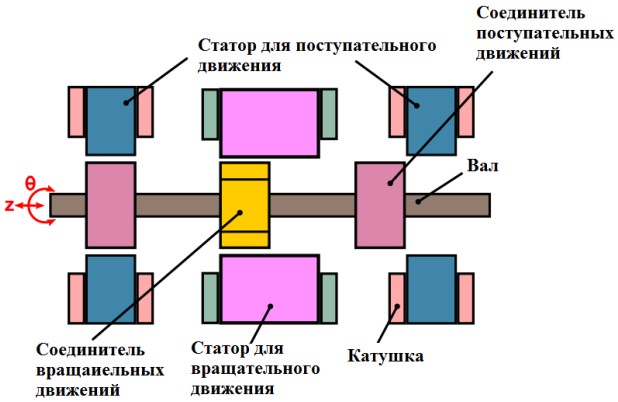


Рис. 12. Серия типа роторно-линейных машин с переменным магнитным сопротивлением

Статор таких машин состоит из трёх частей, вокруг которых выступают столбики и концентрированные витки. Две внешние части статора предназначены для линейного движения, а внутренняя часть для вращательного. Аналогичным образом имеются три железных сердечника размещенные на валу: два сплошных цилиндра для линейного движения и один для вращательного движения с выступающими столбиками. Вал производит возвратно поступательные движения, сопоставляя каждый сердечник с обмотками статора, за счёт чего изменяется магнитное поле.

Исходя из простоты конструкции, высокой эффективности машины и низкой стоимости, данный генератор является самым подходящим для рассматриваемого вопроса ПС РЛМ (рис. 13).

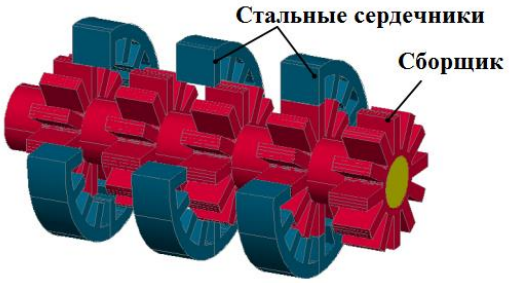


Рис. 13. Железные сердечники модульной роторно-линейной машины с переменным магнитным сопротивлением (ПС РЛМ)

3) Малые ветроэнергетические установки могут служить основными источниками электроэнергии для различных жилых или коммерческих потребностей. В то время как большие ветровые турбины уже достигают своих пределов в рамках существующих технологий по эффективности, небольшие преобразователи энергии ветра все еще находятся в интенсивном изучении и развитии. Большая часть этих исследований сосредоточена на электрических генераторах, поиске лучших технологий и повышении их эффективности и других характеристик. Рассмотрим некоторые конфигурации модульных генераторов переменного магнитного сопротивления, которые имеют большую эффективность по сравнению с обычными генераторами [6].

• Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком. В данных концептах генераторов, статор, ротор или оба могут быть построены по модульному принципу. Сегментация статора производится при помощи С- или Е-образных ламинированных модулей из электротехнической стали.

В данной модели статор генератора состоит из восьми U-образных модулей (сегментов), которые при соединении друг с другом образуют статор генератора (рис. 14). Каждый модуль состоит их железного сердечника, на который помещается медная катушка. Модули друг от друга отделяются специальной немагнитной прокладкой [6]. Модули статора расположены по окружности в радиальном направлении относительно ротора, что создает переменный, радиальный магнитный поток. Также у данной конструкции имеются ключевые преимущества: легкая и дешёвая сборка; высокая отказоустойчивость; значительно снижается количество затрачиваемого железа на сердечник, а также меди, применяемой в качестве обмоток, в результате чего уменьшаются производственные затраты и потери; быстрая замена поврежденного модуля. Модули ротора размещены непосредственно на немагнитный стальной вал и полностью отделены как физически, так и магнитно друг от друга. Из-за чего создается мощный концентрированный магнитный поток, имеющий более короткие пути прохождения в роторе. Это все создает высокий крутящий момент и эффективность данной конструкции [6].

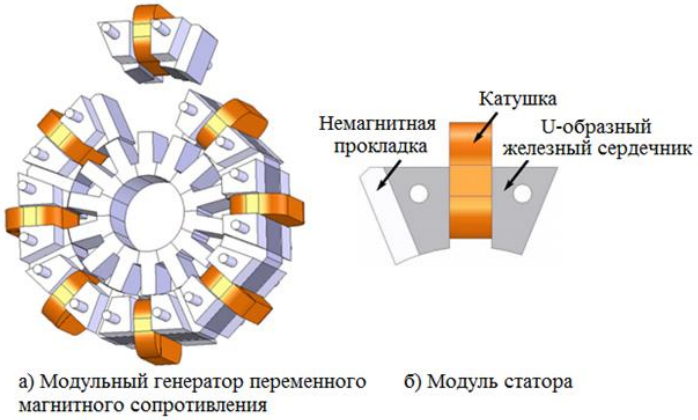


Рис. 14. Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком

• Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с аксиальным потоком (рис. 15). Данная конструкция имеет тот же принцип работы, что и классический генератор переменного сопротивления с радиальным потоком, с той лишь разницей, что их магнитный поток ориентирован в параллельном (аксиальном) направлении с валом [6].

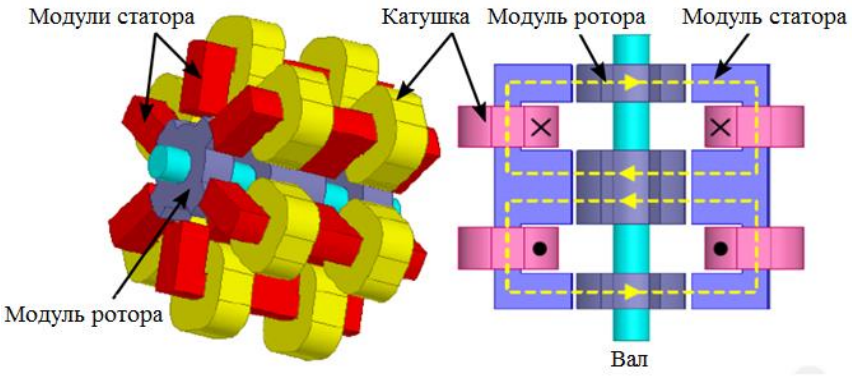


Рис. 15. Модульный генератор переменного магнитного сопротивления с аксиальным потоком

Ротор генератора состоит из Е-образных модулей, насаженных на вал. Статор генератора имеет катушки, намотанные по две штуки параллельно друг другу на каждый модуль статора. Причем катушки намотаны в разных направлениях. Такая вариация статора создает аксиальный, переменный магнитный поток. Эта конструкция обеспечивает малую массу и инерцию, впоследствии чего сокращаются затраты на материалы [6].

• Модульный двойной генератор с постоянными магнитами (рис. 16). Данная конфигурация генератора очень похожа на модульный генератор переменного магнитного сопротивления с радиальным потоком, только вместо немагнитных прокладок, модули статора отделяются друг от друга постоянными магнитами [6].

Данная машина имеет значительные потери в пассивном железном сердечнике. Уменьшить эти потери без существенного снижения выходного крутящего момента, было осуществлено путем сегментации также и его ротора [6].

Данный генератор демонстрирует высокий крутящий момент и большую мощность по сравнению с другими магнито-коммутационными генераторами и генераторами с постоянными магнитами, а также уменьшается несбалансированная радиальная магнитная сила [6].

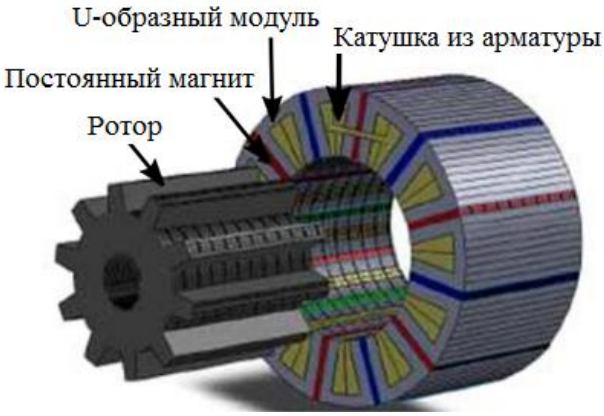


Рис. 16. Машина с постоянными магнитами переменного потока

• Генератор с поперечным потоком (рис. 17). Данные генераторы являются одними из самых новых разработок электрических машин. Их отличительной чертой является поперечное направление путей потока и гомополярная магнитодвижущая сила, создаваемая катушкой кольцевого типа. В катушке ток течет параллельно направлению вращения вала.

Основное преимущество генератора с поперечным магнитным потоком обусловлено его особой конструкцией в том, что число полюсов может быть увеличено (снижение синхронной скорости) без понижения магнитодвижущей силы и мощности. За счёт низких синхронных скоростей, которые могут быть близки к фактической скорости ветра, данные агрегаты отличные кандидаты на генераторы, с прямым приводом используемые в ветряных турбинах.

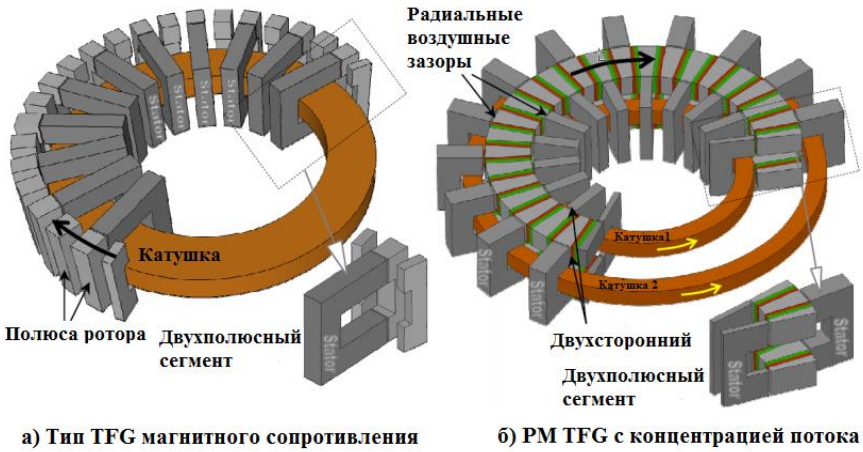


Рис. 17. Два модульных варианта генератора с поперечным потоком

4) Рассмотрим магнито-коммутационную машину с постоянными магнитами (МКПМ) (рис.18). Данные синхронные машины имеют постоянные магниты, закрепленные в корпусе статора. Магниты противоположно намагничены в окружном направлении, таким образом, поток двух соседних магнитов концентрируется в направлении воздушной прослойки. Ротор машины не имеет обмоток и магнитов, но имеет прорези (пазы). Данные пазы по структуре такие же, как у роторов машин с переменным сопротивлением. Это делает более мощный магнитный поток в воздушном зазоре [7].

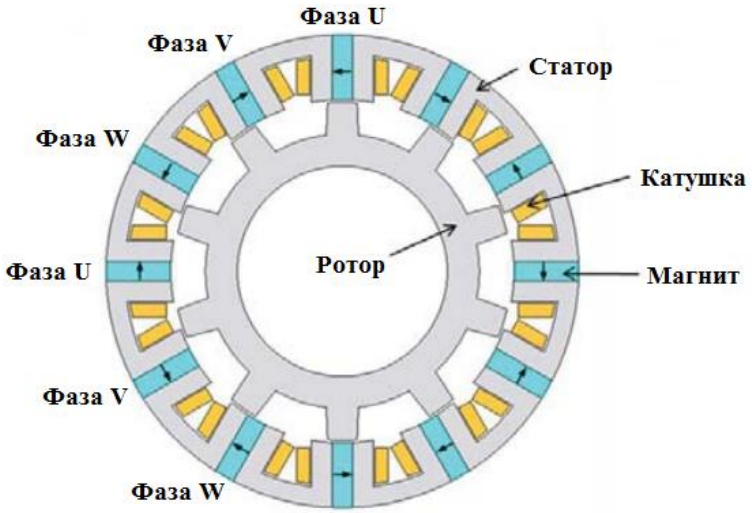


Рис. 18. Разрез разрабатываемой модели магнито-коммутационной машины с постоянными магнитами (МКПМ)

За счёт большего количества полюсов, данная машина хорошо подходит для мало-скоростных приводов с высоким моментом. Также эти машины имеют хорошую охлаждающую способность магнитов, так как в отличие от традиционных машин, где магниты расположены на роторе, в данном варианте магниты располагаются на статоре [7].

Опытным путём сравнения данной МКПМ машины с обычной синхронной машиной с постоянными магнитами (СМПМ) было выявлено, что МКПМ обладает меньшим коэффициентом мощности (0,69) по сравнению с СМПМ (0,96). Это вызвано индукцией, которая в 3 раза больше у первой машины. С другой стороны, МКПМ имеет на 1,3 % большую эффективность из-за более высокой плотности потока в воздушном зазоре [7].

5) Вот ещё одна конструкция электрически возбужденного явнополюсного генератора для использования в небольших ветровых турбинах в диапазоне малой мощности, до 2 кВт (рис. 19). Концепция основана на использовании непосредственно управляемого, электрически возбужденного синхронного генератора, который позволяет использовать относительно низкие скорости, например, ветровые и водяные турбины или электродвигатели с двигателем без трансмиссии. Рабочая точка максимальной эффективности может быть отрегулирована за счет переменного возбуждения в технически наиболее выгодном рабочем диапазоне системы [8].

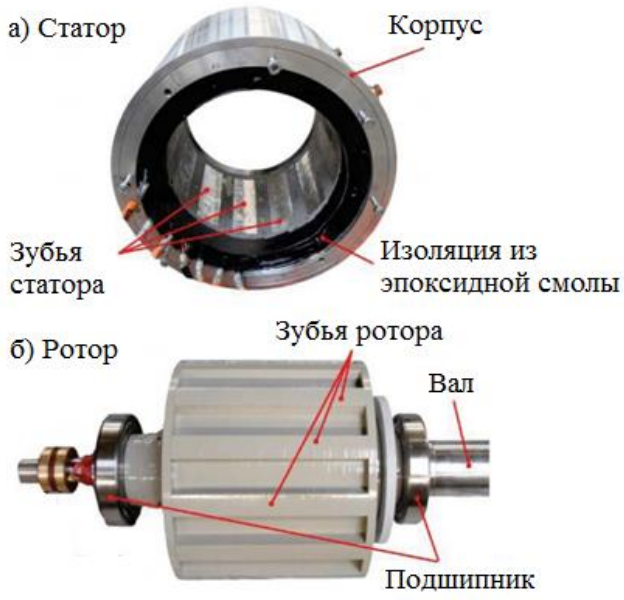


Рис. 19. Конструкция электрической машины
а) Статор; б) Ротор прототипа 45 кВт магнито-коммутационной машины
с постоянными магнитами (МКПМ)

Основное внимание уделяется использованию в небольших ветровых турбинах, потенциал которых на внутренних местах и местах со слабым ветром.

Потенциальные результаты не только применимы к малым ветровым турбинам, но также могут применяться в других областях, где преобразование энергии происходит через низкоскоростную электрическую машину [8].

6) Рассмотрим ещё один уникальный генератор мощностью 20 МВт, с использованием сверхпроводящего материала – диборида магния (MgB2) (рис. 20). Диборид магния используется в качестве материала для обмоток статора и ротора. Ленты из MgB2, работающие при температуре 10 K, используются для обмоток ротора, чтобы улучшить коэффициент уплотнения. Кабель Резерфорда, выполненный из 91-нитевидных проводов MgB2, работающих при температуре 20 K, используется для обмоток статора, чтобы ограничить потери переменного тока. Для статора и ротора рассматриваются два отдельных криостата для повышения надежности системы. Криостат статора статичен, а криостат ротора вращается. Между криостатами помещен медный электромагнитный экран для предотвращения высокочастотных гармоник идущих от обмоток статора. Кроме того, чтобы уменьшить вес машины и упростить криогенную систему, применяется беззубчатая магнитная цепь. По мнению авторов данной вариации генератора, криогенная и электромагнитная системы сильно связаны, и благодаря их сочетанию можно добиться значительного снижения расчётной стоимости энергии [9].

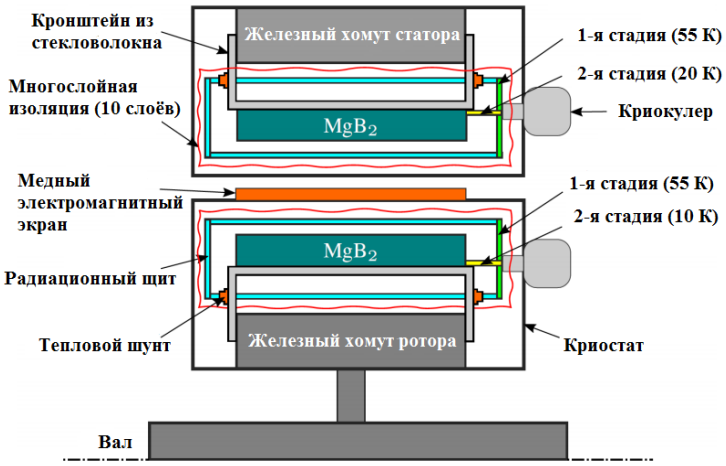


Рис. 20. Криогенная конструкция

Результаты показали, что рассмотренная технология является легкой, позволяющей снизить стоимость гондолы, башни и фундамента, а следовательно, и нормативную расчётную стоимость энергии по сравнению с обычным генератором. Но потери переменного тока велики, и они требуют на данном этапе исследования нецелесообразного количества криокулеров [9].

7) Среднескоростной синхронный генератор магнитного сопротивления. Рассмотрим данный генератор мощностью 2 МВт, как эффективное, надежное и недорогое решение для современных ветровых турбин, так как такие машины не требуют магнитов или медной обмотки в роторе [10]. Незначительная скорость вращения генератора позволяет использовать одноступенчатую коробку передач вместо многоступенчатой коробки передач, что повышает надежность силового агрегата ветровой турбины. Устранение постоянных магнитов и медной обмотки снижает инвестиционные затраты, в то время как повышенная эффективность и улучшенная надежность приводят к снижению эксплуатационных расходов и, следовательно, затрат энергии (рис. 21).

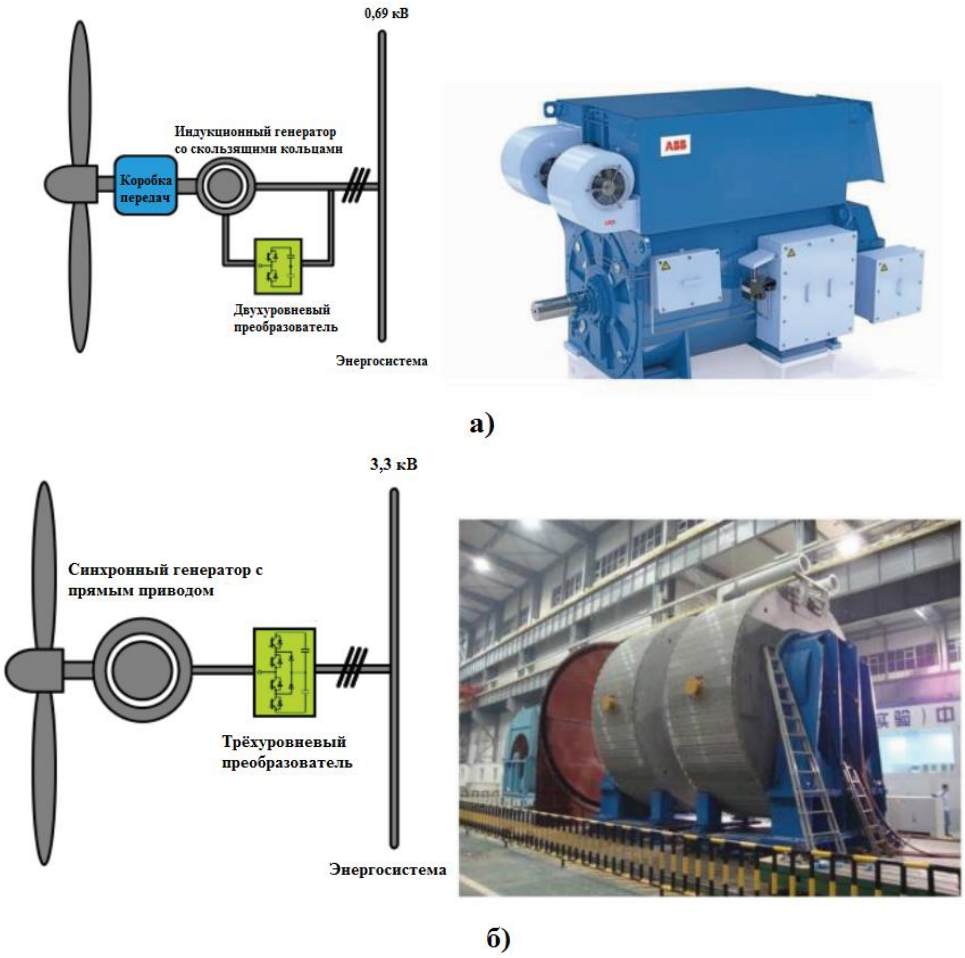


Рис. 21. Современные концепции ветряных турбин с переменной скоростью: а) Индукционный генератор двойного питания с преобразователем частичного масштаба; б) Синхронный генератор с прямым приводом с полномасштабным преобразователем

V. Выводы и заключение

В данной статье были рассмотрены различные современные концепты ветровых турбин, которые позволяют снизить затраты на эксплуатацию, имеют высокую эффективность, а также сравнительно низкую стоимость.

Ветряные турбины с устройствами контроля частоты и напряжения очень даже перспективны, с точки зрения установки на территории России, так как большие территории имеют нестабильность в плане энергии ветра. Агрегаты, рассмотренные выше, могли бы решить данную проблему, так как внедрение турбин с синхронным генератором, играющего роль «хранилища энергии», приводит к улучшению показателей АЧХ. Таким образом, развитие данного ответвления отрасли является перспективным для Российской Федерации.

Что касается ветряных электростанций в открытом море, то можно с уверенностью сказать, что при эксплуатации данных установок будут возникать сложности разного характера. Например, погодные условия, мусор, плавающий в водоёме, могут часто наносить повреждения ВЭУ и возможно даже выводить их из строя.

Если данная установка находится на большом расстоянии от берега, то ремонтной бригаде будет тяжело из раза в раз добираться до нее. Другая проблема – это фауна водоёма, в котором находятся данные ВЭУ. Нельзя с уверенностью говорить о том, что какая-нибудь крупная рыба не захочет атаковать установку. Однако большие потенциалы водных массивов заставляют все-таки задуматься о развитии данных установок, следует подумать о некоторой защите установок и тогда эти генераторы займут лидирующую позицию среди ветрогенераторов.

Ну, а что касается самих концептов генераторов, все они, рассмотренные в данной статье, являются альтернативой ныне используемым генераторам, за счёт сравнительно низкой стоимости, меньших массогабаритных параметров, меньших затрат на производство, а также высокой энергоэффективности. Однако многие из них являются лишь концептами либо единичными экземплярами, это все связано с малым финансированием в область ветроэнергетики.

Подводя итоги можно сказать что, уменьшение веса, габаритов, введение новых универсальных материалов для изготовления конструктивных частей ветроэнергетических установок, совершенствование анализа работы агрегатов и механизмов контроля – всё это говорит о том, что со временем рынок возобновляемых источников энергии будет занимать одно из лидирующих позиций в мире. К сожалению, ископаемые Земли ограничены, данный факт, бесспорно, заставляет человека искать пути решения проблемы энергоресурсов для жизни. Россия – страна богатая полезными ископаемыми, поэтому у нас пока что только рассматривают возможность обширного внедрения ВЭУ по всей территории, несмотря на имеющийся мощнейший ветроэнергетический потенциал.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-5446.2018.8
Научный руководитель Бубенчиков Антон Анатольевич.

Список литературы

1. Nouri Navid, Masoud Barakati S. Implementing Virtual Synchronous Generator to Load-Frequency Control with Penetration of Wind Turbine Considering Limitation of Storage System Capacity // Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on, 2018. DOI: 10.1109/ICEE.2018.8472508.

2. Abbou Ahmed, Elakhrif Rachid, Mousmi Ali. Vrms control of self-excited induction generators feeding a three-phase AC load used in wind turbine // 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), 2018.

3. Bhardwaj Prerak, Vijayakumar K. Modelling, operation and speed estimation of standalone wind driven doubly fed induction generator // 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), 2018.

4. Bonfiglio Andrea, Invernizzi Marco, Labella Alessandro, Procopio Renato. Design of a Superconducting DC Demonstrator for Wind Generators // IEEE Transactions on Power Systems (Early Access), 2018.

5. Szabó Loránd. On the use of rotary-linear generators in floating hybrid wind and wave energy conversion systems // 2018 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 2018.

6. Loránd Szabó. Novel variable reluctance generators used in small wind turbines: The modular approach // 2018 19th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2018.

7. Marcel Lehr, Daniel Dietz, Andreas Binder. Electromagnetic design of a permanent magnet Flux-Switching-Machine as a direct-driven 3 MW wind power generator // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2018.

8. Fabian Lorenz, Ralf Werner, Matthias Föse. Claw pole generator with adapted efficiency curve for small scale wind turbines // 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2018.

9. Trung-Kien Hoang, Loïc Quéval, Christophe Berriaud, Lionel Vido. Design of a 20-MW Fully Superconducting Wind Turbine Generator to Minimize the Levelized Cost of Energy // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, June 2018. Vol. 28, Is. 4. DOI: 10.1109/TASC.2018.2810309.

10. Alnajjar M., Gerling D. Medium-Speed Synchronous Reluctance Generator as Efficient, Reliabile and Low-Cost Solution for Power Generation in Modern Wind Turbines // 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018.

11. URL: http://24news.com.ua (дата обращения: 14.12.2018).

12. ГОСТ Р 55890-2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. Введ. 2014-09-01. М. : Стандартинформ, 2014. 20 с.

УДК 621.311

ОБЗОР НАКОПИТЕЛЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МАХОВИКОВОГО ТИПА

А. А. Бубенчиков, Н. А. Терещенко, Т. В. Бубенчикова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье представлен обзор отечественных и зарубежных разработок накопителей энергии маховикового типа, которые необходимы для накопления, хранения и отдачи электроэнергии, работы в качестве резервных и аварийных источников питания. Указаны области применения накопителей. Произведен анализ параметров геометрии маховика, влияющих на накопление энергии.**

Ключевые слова: титановый маховик, удельная энергоемкость, кинетический накопитель, углеродное волокно, магнитный подвес, геометрия маховика, оптимизированная конструкция.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-53-59

I. Введение

В настоящее время, благодаря широкому развитию промышленности, растут показатели потребления электроэнергии. Поэтому целесообразно заменить традиционные источники энергии на альтернативные. Большинство альтернативных источников энергии являются непостоянными, вследствие этого возникает проблема выработки бесперебойной энергии. Применение эффективных способов аккумулирования электроэнергии позволит справиться с такой проблемой. Сегодня одним из наиболее перспективных способов накопления кинетической энергии является маховик.

Маховик представляет собой массивное вращающееся колесо, которое используют в качестве инерционного аккумулятора. Благодаря наличию привода (механического или электрического), маховик раскручивается, а во время вращения и происходит запас кинетической энергии. В моменты избытка энергии, маховик запасает её, а во время дефицита – отдает, что позволяет выровнять поступление энергии [1]. Кроме того, работу махового колеса можно встретить практически везде, начиная от детских игрушек «йо-йо» и заканчивая применением на космических станциях. Так же при накоплении энергии, маховик способен сохранять направление оси вращения. Данное свойство часто применяется для успокоения корабля при качке от волн. Еще одним преимуществом маховика является его применение в автотранспорте, это позволяет заметно экономить топливо, что актуально при существующих ценах на нефть в XXI веке.

Современный маховиковый кинетический накопитель создает весьма значительную конкуренцию широко распространенным химическим накопителям и будет продолжать набирать обороты, т. к. имеет ряд преимуществ.

– наличие значительной энергоёмкости и возможность выдавать большими «порциями» мощность в сеть;
– маховики являются экологически чистым устройством;
– достаточно высокий КПД (92–97 %);
– долговечность и надёжность;
– наличие неограниченного количества заряда и разряда [2–5].

В корпоративной газете «Энерговектор» представлено преимущество маховиковых систем накопления энергии относительно емкостных и ионно-литиевых аккумуляторов по следующим параметрам: удельная мощность, количество циклов работы и масса системы для электроприводного транспорта [6].

Указанные выше преимущества кинетического накопителя и широкое применение в жизни человека, повышает интерес ученых к данному устройству. Следовательно, увеличивается количество исследований по данной тематике, связанных с модернизацией конструкции. В тоже время ученые исследуют высокотехнологичные материалы, определяют энергетические параметры, которые влияют на эффективность конструкции.

Отечественный опыт. Самым известным учёным в России, который исследовал данное устройство, является Нурбей Владимирович Гулиа. Посвятив десятки лет усовершенствованию маховика, он смог обезопасить конструкцию. Ведь при увеличении скорости вращения маховика, частицы «растягивают» диск, впоследствии чего происходит разрыв конструкции. В данном случае он заменил монолит, который при аварии разлетается на огромное количество осколков, лентой из высокопрочного синтетического волокна, которая при повреждении может тормозить, упираясь о стенку кожуха.

Еще одной немаловажной задачей для проектировщиков, является создание маховиков с весьма огромным запасом прочности. Нурбей Владимирович нашел и в данной ситуации выход. При проведении экспериментов, оказалось, что при значительном увеличении запаса прочности, энергоёмкость устройства изменяется незначительно. Проведя опыты с различными материалами, выявили, что литая лента по сравнению с лентой из тонкой и высокопрочной стали меньше накапливает энергии, а использование сверхпрочных стеклянных или

синтетических волокон позволит в разы увеличить энергоемкость маховика [7–8]. На данный момент Нурбей Владимирович имеет патент «Маховичный накопитель энергии с горизонтальной осью вращения» [9], который положил начало развитию разработок супермаховика.

Сегодня в России известны компании: «Кинемак» и «Русский сверхпроводник», поставляющие на рынок маховичные накопители энергии. Компания «Кинемак» разработала и произвела маховиковый накопитель кинетической энергии для подъемно-транспортного оборудования, способный экономить потребляемую краном электроэнергию и сетевую мощность. Полученный КПД такого маховика порядка 40%, что превышает показатели зарубежных аналогов [10]. В свою очередь корпорация «Русский сверхпроводник» смогла разработать НКЭ с максимальной энергоемкостью – 5 МДж и мощностью в 22 кВт на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения [11].

Зарубежный опыт. Компания ATZ (Германия) разработала кинетический накопитель энергии (КНЭ), способный запасать 20 МДж. Мощность такого накопителя составляет 250 кВт. Особенности конструкции накопителя – это магнитный подвес на основе высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) керамики и использование системы синхронизации с сетью. Материал, из которого изготовлен маховик – углеродное волокно [12].

В настоящее время лидирующие позиции на зарубежном рынке заняла компания Beacon Power. При производстве маховиков она изготавливает композитный обод из углеродного волокна. Обод поддерживается ступицей и валом, к которому присоединен мотор-генератор. Все, указанные элементы составляют узел ротора. В моменты пиков электрической энергии, она превращается в механическую, заряжая маховик. В этот момент маховик является нагрузкой, вытягивая энергию из системы, для увеличения скорости вращения ротора. Отдача энергии в сеть происходит за счет того, что инерционное движение ротора заставляет вращать двигатель, который в данном случае работает в режиме генератора [13]. Скорость ротора в данной конструкции достигает 16000 об/мин. Преимущество конструкции достигается тем, что используют герметичную вакуумную камеру. Это позволяет избавиться от трения, кислорода и влаги в устройстве, что увеличит срок службы и уменьшит износ устройства.

Накопитель Gyrodrive, выпускаемый британской компанией GKN, нашёл широкое применение в автомобильной отрасли как рекуператор энергии. Скорость маховика в данном устройстве достигает 36000 об/мин. Сам же маховик выполнен из карбона и находится в вакуумном корпусе. Во время разгона автомобиля кинетическая энергия маховика, преобразуясь в электрическую, подпитывает тяговый двигатель. Это способствует более лёгкому ускорению автомобиля. При торможении автомобиля происходит накопление энергии маховиком. Таким образом, использование маховика позволяет не только экономить топливо, но и сократить количество вредных выбросов в атмосферу [14].

В источнике [15] представлена усовершенствованная конструкция системы маховика. Основная отличительная черта – использование гибридных магнитных подшипников, а именно, в осевых направлениях устройства располагаются активные магнитные подшипники, а в радиальных – подшипники с постоянными магнитами. За счет того, что используется активный магнитный подшипник с контролируемым электромагнитом, данная конструкция имеет высокий КПД. Это достигается за счёт отсутствия трения между вращающимися телами. Конструкция может быть использована для длительной бесперебойной работы, а так же быть применена для обмена импульсов в устройстве.

Американская компания Boeing изобрела КНЭ с энергоемкостью в 35 кВт·ч., мощность которого составила 3 кВт; а запасаемая энергия – 5 кВт·ч. Работы велись в направлении определения конструкции способной выдавать в сеть максимальную мощность и запасть максимальную энергию.

Компания POWERTHRU (шт. Мичиган) в конструкции маховика использует молекулярный насос с геликоидом, расположенным на валу маховика. Емкость такого модуля способна достигать 528 Вт·ч, для увеличения объема емкости можно параллельно соединить несколько модулей. Маховик компании POWERTHRU выполнен из прочного углеродного волокна [16].

II. Постановка задачи

Произведя обзор существующих конструкций, поставили цель: определить параметр, который в большей степени влияет на определение оптимальной конструкции маховика. Из анализа источников, выявили следующие параметры маховика:

1. Материал. Сегодня маховик можно изготовить из стали, алюминиевых сплавов, титана, но в последнее время преимущество отдают композитным материалам на основе стекловолокна, углеродного волокна или кевлара. У данных материалов наблюдается высокая удельная прочность, которая может запасать большой объём энергии при большой скорости маховика [17–19].

2. Геометрия. Параметр, контролирующий способность накопления кинетической энергии маховика; позволяющий оптимизировать форму устройства. Так же позволяет уменьшить нагрузку на вал и подшипники.

3. Скорость вращения. В связи с тем, что накопленная энергия маховика зависит от квадрата скорости вращения, то максимальная скорость должна быть соотнесена с максимальной прочностью на разрыв маховика, материал и внешний его диаметр [20].

4. Электрическая машина (двигатель/генератор). Тип и параметры этого компонента зависят от системы применения и продолжительности хранения энергии. Чаще всего используют синхронные машины с постоянными магнитами.

5. Подшипниковая система. Могут быть использованы механические подшипники (шарнирные, сферические или конические при низких скоростях), магнитные подшипники (пассивные и активные), или комбинации магнитных подшипников и механических подшипников. К последнему поколению относят высокотемпературные сверхпроводниковые подшипники, в которых потери из-за трения составляют на два порядка меньше, чем у магнитного подшипника и в несколько порядков, чем у механического.

III. Теория

Подробно рассмотрим параметр геометрия. В программном пакете SolidWorks была создана трехмерная модель маховика, который представлен в виде диска с ободом и ступицей рис. 1.

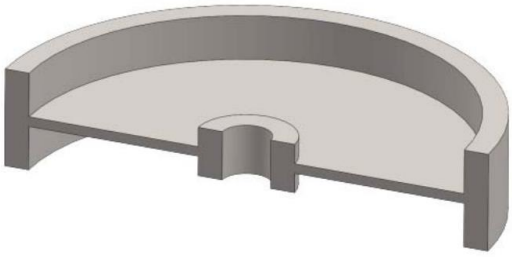


Рис. 1. Трехмерная модель маховика

Во внимание возьмём параметры, которые существенно влияют на поведение маховика: диаметр (Dr), ширина (gr), высота обода (Hr) и толщина диска (gd). Всего будет задействовано 7 параметров (рис. 2), из них неизменными будут величины: gh = 5 мм, Hh = 10 мм и Dh = 10 мм. Исследуемый маховик выполнен из материала Ti-6Al-4V (титановый сплав), который имеет свойства: модуль упругости: 104800,31 МПа; коэффициент Пуассона: 0,31; прочность на растяжение: 1050 МПа; предел текучести: 827,37 МПа; плотность массы титана: 4428,78 кг/м3.

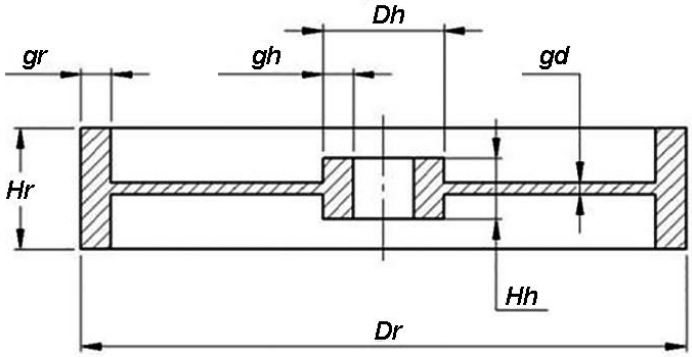


Рис. 2. Двухмерный чертеж маховика (вид в разрезе)

При исследовании диаметра обода величина Dr будет изменяться от 100 до 110 с шагом в 1 мм, gr = 5 мм, gd = 2 мм; Hr = 20 мм.

При исследовании ширины обода величина gr будет изменяться от 3 до 8 с шагом в 0,5 мм, Dr = 100 мм, gd = 2 мм; Hr = 20 мм.

При исследовании высоты обода величина Hr будет изменяться от 10 до 30 с шагом в 2 мм, Dr = 100 мм, gd = 2 мм; gr = 5 мм.

При исследовании толщины диска величина gd будет изменяться от 1,5 до 4 с шагом в 0,25 мм, Dr = 100 мм, gr = 5 мм, Hr = 20 мм.

Для каждой конфигурации, используя возможности Evaluate, вкладка в SolidWorks CommandManager, рассчитали массу маховика (м) и момент инерции (I). Так же, учитывая, что маховик вращается со скоростью 7000 об/мим (угловая скорость при этом составляет 733,0383 рад/с), по формулам (1) и (2) рассчитали кинетическую энергию (Ек), хранящуюся в маховике, и удельную энергию (ЕУД):

$$E_K = 0,5 \cdot I \cdot \omega^2 , \quad (1)$$

$$E_{УД} = \frac{E_к}{m}. \quad (2)$$

Рассчитанные параметры маховика, масса, момент инерции, кинетическая энергия и удельная энергия представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РАССЧИТАННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАХОВИКА

***Dr*,мм**	***m*, кг**	***I*, кг·мм^2**	***E*$_K$, Дж**	***E*$_{УД}$, Дж/кг**
100	0,196	356,619	95,814	488,846
101	0,199	368,723	99,066	497,818
102	0,201	381,114	102,395	509,427
103	0,204	393,795	105,802	518,637
104	0,207	406,772	109,288	527,964
105	0,21	420,047	112,855	537,405
106	0,212	433,625	166,503	549,543
107	0,215	447,51	120,234	559,226
108	0,218	461,707	124,048	569,028
109	0,221	476,218	127,947	578,944
110	0,223	491,049	131,931	591,621
***gr*, мм**	***m*, кг**	***I*, кг·мм^2**	***E*$_K$, Дж**	***E*$_{УД}$, Дж/кг**
3	0,15	259,065	69,604	464,024
3,5	0,16	284,654	76,479	472,091
4	0,173	309,432	83,136	480,554
4,5	0,185	332,414	89,579	484,212
5	0,196	356,619	95,814	488,846
5,5	0,207	379,063	101,844	491,999
6	0,218	400,763	107,674	493,918
6,5	0,229	421,735	113,309	494,797
7	0,24	441,997	118,752	494,802
7,5	0,251	461,565	124,01	494,063
8	0,262	480,453	129,085	492,689
***gd*, мм**	***m*, кг**	***I*, кг·мм^2**	***E*$_K$, Дж**	***E*$_{УД}$, Дж/кг**
1,5	0,183	342,39	91,991	502,682
1,75	0,189	349,504	93,902	496,837
2	0,196	356,619	95,814	488,846
2,25	0,203	363,733	97,725	481,404
2,5	0,21	370,847	99,636	474,459
2,75	0,216	377,962	101,548	470,13
3	0,223	385,076	103,459	463,943
3,25	0,23	392,19	105,371	458,133
3,5	0,236	399,305	107,282	454,586
3,75	0,243	406,419	109,194	449,357
4	0,25	413,533	111,105	444,42
***Hr*, мм**	***m*, кг**	***I*, кг·мм^2**	***E*$_K$, Дж**	***E*$_{УД}$, Дж/кг**
10	0,13	207,093	55,64	428,002
12	0,143	236,998	63,675	445,279
14	0,157	266,903	71,71	456,748
16	0,17	296,808	79,744	469,083
18	0,183	326,714	87,779	479,667
20	0,196	356,619	95,814	488,846
22	0,209	386,524	103,848	496,882
24	0,223	416,329	111,883	501,718
26	0,236	446,334	119,918	508,126
28	0,249	476,239	127,952	513,865
30	0,262	506,145	135,987	519,035

На рис. 3–6 представлено поведение маховика, оцениваемое тем, как удельная энергия, накопленная маховиком, зависит от параметров, выбранных для анализа.

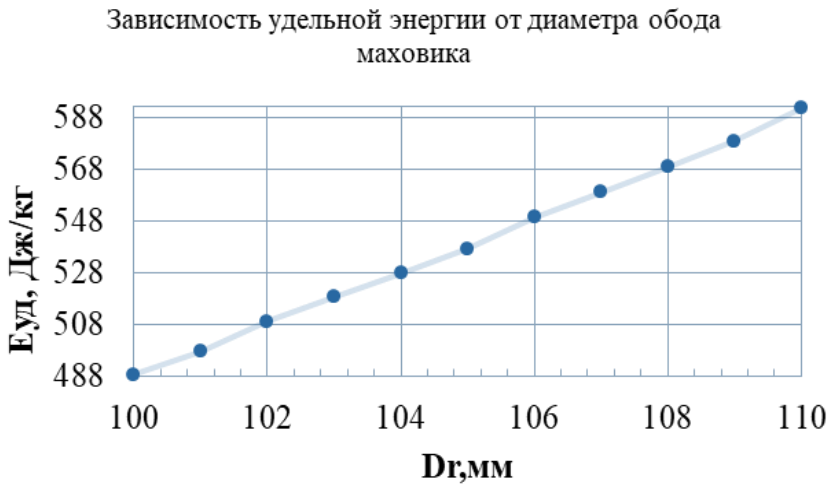


Рис. 3. Зависимость удельной энергии от диаметра обода маховика

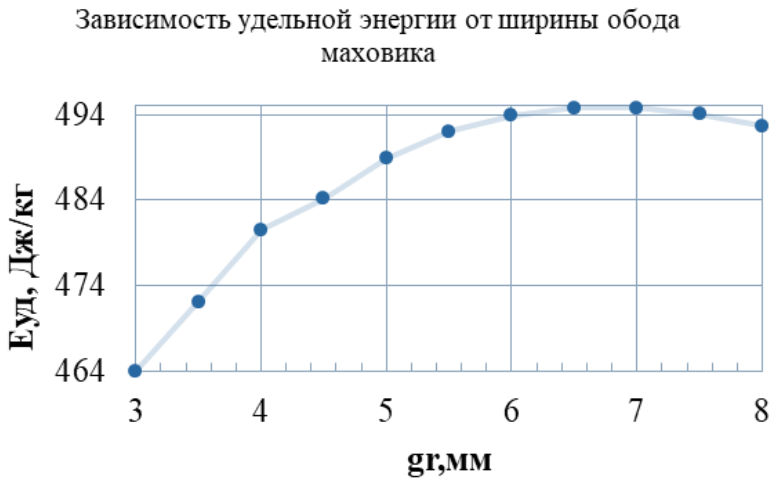


Рис. 4. Зависимость удельной энергии от ширины обода маховика

Рис. 5. Зависимость удельной энергии от высоты обода маховика

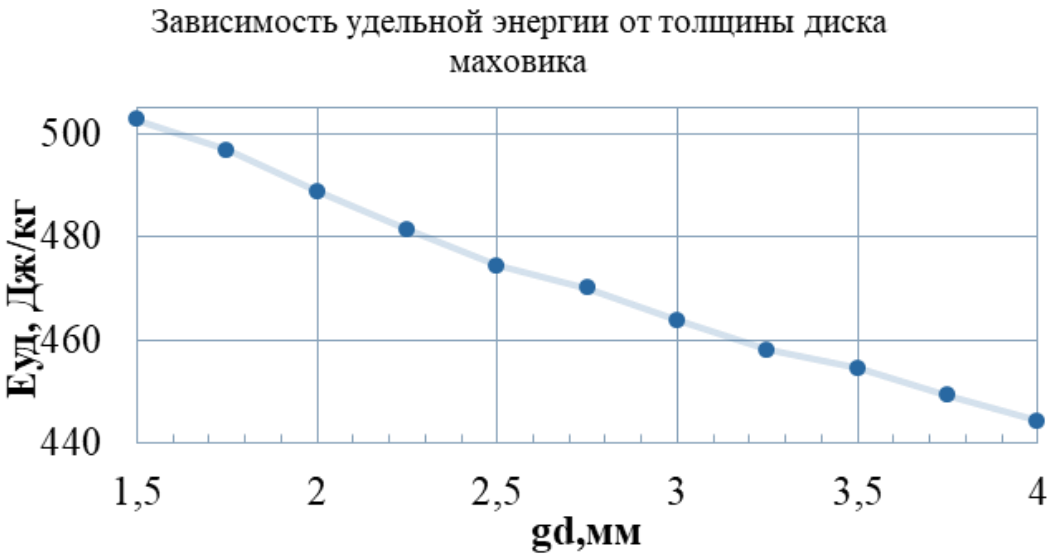


Рис. 6. Зависимость удельной энергии от толщины диска маховика

IV. Результаты экспериментов и их обсуждение

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что при увеличении диаметра обода маховика (Dr) от 100 мм до 110 мм (10 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 488,846 Дж/кг до 591,621 Дж/кг (21,02 %).

Из табл. 1 и рис. 4 видно, что при увеличении ширины обода маховика (gr) от 3 до 8 мм (166,67 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 464,024 Дж/кг до 492,689 Дж/кг (6,18 %).

Из табл. 1 и рис. 5 видно, что при увеличении высоты обода маховика (Hr) от 10 до 30 мм (200 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком увеличивается с 428,002 Дж/кг до 519,035 Дж/кг (6,18 %).

Из табл. 1 и рис. 6 видно, что при увеличении толщины диска маховика (gd) от 1,5 мм до 4 мм (166,67 %), удельная энергия (ЕУД), накопленная маховиком уменьшается с 502,682 Дж/кг до 444,42 Дж/кг (–11,59 %).

Таким образом, наибольшее воздействие на увеличение удельной энергии маховика вносит диаметр обода маховика, а наименьшее, а точнее уменьшение удельной энергии – толщина диска.

V. Выводы и заключение

Несмотря на то, что в России маховики ещё не достигли своего пика, виден большой шаг в развитии этих устройств. Уже сегодня кинетические системы накопления энергии, могут успешно заменить весьма распространенные химические накопители, имея достаточно многочисленные преимуществам. Также события последних лет в данной области позволяют применять более прочные материалы, усовершенствованную силовую электронику и системы подшипников. А существующие программные пакеты позволяют создать большое количество конфигураций маховика путем изменения некоторых параметров, которые имеют значительное влияние на его поведение. Из анализа созданных конфигураций, пришли к выводу, что наибольшее влияние на удельную энергию, накопленную маховиком, имеет диаметр маховика, затем следуют ширина обода и высота обода, а при увеличении толщины диска удельная энергия уменьшается.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента № МК-5446.2018.8.

Научный руководитель Бубенчиков Антон Анатольевич.

Список литературы

1. Худяков В. В. Возобновляемые источники энергии // Электричество. 2011. №. 10. С. 35–40.

2. Диски высокой энергии: маховичный накопитель // Популярная механика. URL: https://www.popmech.ru/technologies/8424-diski-vysokoy-energii-makhovichnyy-nakopitel/#part2 (дата обращения: 25.01.2019).

3. Гулиа Н. В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152 с.

4. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Школа для электрика. URL: http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/1887-kineticheskie-nakopiteli-jenergii-dlja.html (дата обращения: 25.01.2019).

5. Соколов В. С., Красных О. В., Косторной Г. В. Использование маховиков на транспорте // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2009. № 4 (12). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-mahovikov-na-transporte (дата обращения: 25.01.2019).

6. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Умей вертеться. URL: http://www.energovector.com/energoznanie-umey-vertetsya.html (дата обращения: 25.01.2019).

7. Диски высокой энергии: маховичный накопитель // Умей вертеться. URL: http://magspace.ru/blog/185231.html (дата обращения: 25.01.2019).

8. Маховики для маховичного накопителя // Маховичный накопитель. URL: http://sersalaev.narod.ru/index.files/flyweel4.htm (дата обращения: 25.01.2019).

9. Пат. 132850 Российская Федерация, МПК F 16 F 15/315. Накопитель энергии на основе маховика с вертикальной осью вращения / Гулиа Н. В., Лаврентьев А. И., Юрков С. А., № 2013123661/11; заявл. 23.05.2013; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.

10. Проведены испытания накопителя кинетической энергии для подъемно-транспортного оборудования // Кинемак. URL: http://www.kinemak.ru/?p=190 (дата обращения: 25.01.2019).

11. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости // Наука и техника. URL: http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm (дата обращения: 25.01.2019).

12. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Управление и автоматизация. URL: https://vk.com/@controlsys-kineticheskie-nakopiteli-energii-dlya-elektroenergetiki (дата обращения: 25.01.2019).

13. Разработка электромеханического накопителя энергии для систем бесперебойного электропитания. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/49131/1/TPU570245.pdf (дата обращения: 25.01.2019).

14. Начато производство гибридного привода с маховиком «Gyrodrive»// icarbio. URL: http://icarbio.ru/news/2014/november/gyrodrive.html (дата обращения: 25.01.2019).

15. Başaran S., Sivrioğlu S. Adaptive control of a novel hybrid magnetic bearing flywheel system for use in momentum exchange devices // IEEE. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2013. P. 55–60. DOI: 10.1109/RAST.2013.6581272.

16. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Перспективные технологии. URL: http://www.energovector.com/files/ev02-2017.pdf (дата обращения: 25.01.2019).

17. Попов А. Ю., Госина К. К., Петров И. В., Макарова А. Е., Балова Д. Г., Пепеляев А. В. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский научный вестник. 2015. №. 3 (143). С. 42–46.

18. Рогов В. А., Шкарупа М. И., Велис А. К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. №. 2. 41–49.

19. Синицын В. Ф., Джафаров М. Н., Оганисян М. А. Имитационная модель машины для сводки древостоя // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №. 11. С. 162–166.

20. Сохранение энергии при помощи маховика // Ресурсосбережение и энергоэффективность на строительном форуме. URL: http://building-forum.ru/energosberezhenie/mahovik.php (дата обращения: 25.01.2019).

УДК 62-83:681.532.55

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье приведена разработанная обобщенная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости. Модель разработана с использованием модели импульсного частотно-фазового дискриминатора с дополнительными функциональными возможностями. Это позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования, способы управления данным электроприводом. Приведена классифика-**

ция способов синхронизации и фазирования. Приведена классификация вариантов применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями.

Ключевые слова: ошибка по частоте вращения, фазовая автоподстройка частоты вращения, электропривод.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-59-64

I. Введение

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) и электроприводы с фазовой синхронизацией (ЭПФС) широко используются в робототехнических комплексах, обзорно-поисковых и сканирующих системах и устройствах, регистрирующих и лентопротяжных устройствах, копировальных установках, полиграфических машинах, В основе ССЭ и ЭПФС лежит принцип фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Применение указанных электроприводов, в основном определяется высокой точностью в широком диапазоне регулирования угловой скорости (точность регулирования по углу – единицы угловых секунд, точность по угловой скорости – порядка 0,001%) [1].

Для реализации принцип фазовой автоподстройки частоты в качестве задающего сигнала используются импульсный частотный сигнал fоп, который генерируется с помощью кварцевого генератора, в качестве сигнала обратной связи применяют частотный сигнал fос, который генерируется на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а для организации процесса сравнения этих сигналов используют логическое устройство сравнения (ЛУС), реализуемый в виде импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД).

Применение указанного принципа фазовой автоподстройки частоты [2, 3], позволяет обеспечить высокую точность стабилизации угловой скорости, при относительно более простой схеме управления и не такой высокой стоимости компонентов системы управления, как при применении полностью цифровых систем управления электроприводом [4].

Функциональная схема ССЭ, использующего принцип ФАПЧ, приведена на рис.1, где БЗЧ – блок задатчика частоты, КУ – корректирующее устройство, БОФР – блок определения фазового рассогласования, СП – силовой преобразователь, ЭД – электродвигатель, ИДЧ – импульсный датчика частоты вращения, ФР – фазирующий регулятор, ДП – датчик положения, ЛУС – логическое устройство сравнения, БР – блок регулирования.

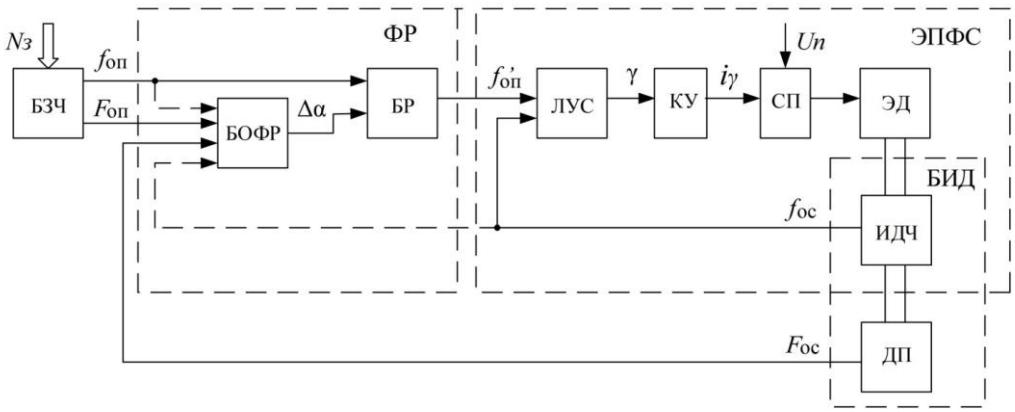


Рис. 1. Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

II. Постановка задачи

В процессе синхронизации на заданной угловой скорости в ЭПФС и ССЭ происходит перерегулирование по угловой скорости, что негативно влияет на динамику электропривода. Для уменьшения перерегулирования по и повышения быстродействия ЭПФС и ССЭ используются различные способы управления электроприводом.

Для реализации наиболее эффективных, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ, способов управления электроприводом в качестве ЛУС необходимо использовать импульсный частотно-фазовый дискриминатор с дополнительными функциональными возможностями: индикацией

режима работы ИЧФД, моментов времени прохождения двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты (моментов изменения углового рассогласования на – угловое расстояние между метками импульсного датчика частоты, где z – число меток ИДЧ) и возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим работы.

Классификация вариантов применения дополнительных возможностей импульсного частотно-фазового дискриминатора в системах управления ЭПФС и ССЭ приведена на рис. 2.

Рис. 2. Классификация вариантов применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями

III. Теория

Эффективным методом исследования электроприводов является метод имитационного компьютерного моделирование [5]. Особенности компьютерного моделирования ССЭ определяются наличием в модели ЭПФС многозначной статической нелинейности. При формировании компьютерной модели ЭПФС и внутреннего контура регулирования в ССЭ могут быть использованы две модели импульсного частотно-фазового дискриминатора:

– с представлением ИЧФД в виде многозначной статической нелинейности с линеаризацией широтно-импульсного модулятора в области высоких частот вращения;

– с представлением ИЧФД в виде логической структуры, учитывающей импульсный характер сравниваемых частотных сигналов.

У каждого из подходов к разработке компьютерной имитационной модели есть свои отличительные особенности. При создании компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора, за основу берется полная модель [11] ИЧФД. При этом отсутствует модель нелинейного элемента, которая бы позволяла моделировать известные способы управления ЭПФС, т.к. в существующих моделях нет индикации состояния нелинейного элемента, (моментов изменения углового рассогласования на) и удобного способа его принудительной установки в требуемый режим.

Целью работы является разработка обобщенной компьютерной модели электропривода, построенного на основе принципа ФАПЧ, с использованием модели ИЧФД (многозначной статической нелинейности с линеаризованным широтно-импульсным модулятором), позволяющей моделировать известные способы управления данным электроприводом при минимизации затрачиваемого на процесс компьютерного имитационного моделирования машинного времени.

На рис. 3 представлена разработанная в Simulink программного пакета Matlab модель нелинейного элемента (ИЧФД) с дополнительными функциональными возможностями: индикацией режима работы нелинейного элемента, моментов изменения углового рассогласования на и с возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим.

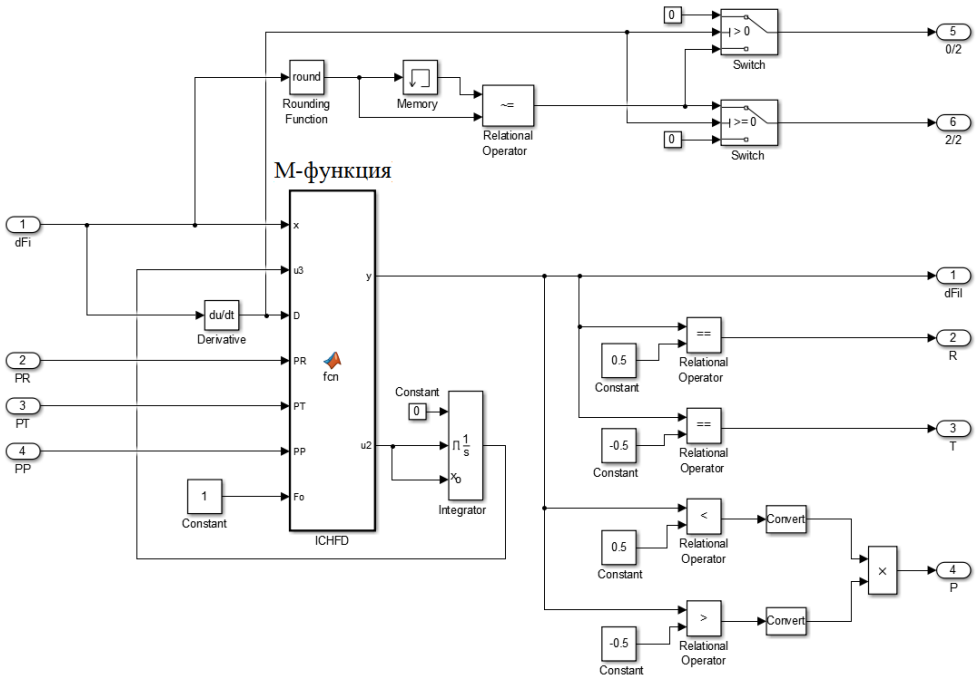


Рис. 3. Модель ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями

На рис.4 представлен алгоритм работы программной части (М-функция) созданной компьютерной модели ИЧФД.

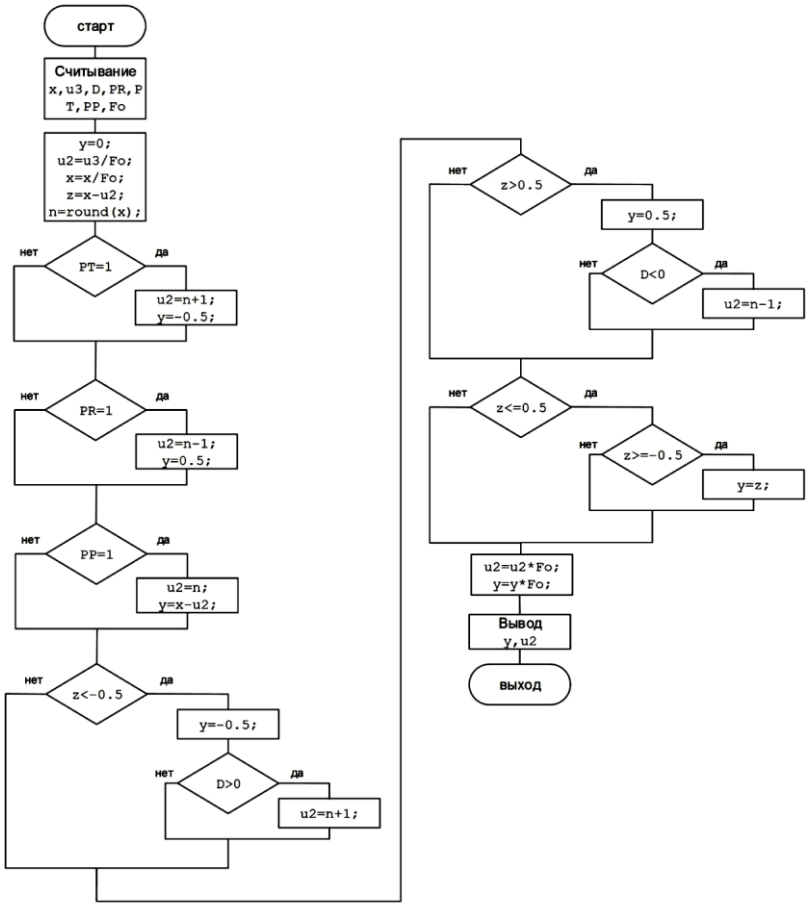


Рис. 4. Алгоритм программы М-функции ИЧФД

Данный алгоритм позволяет принудительно устанавливать импульсный частотно-фазовый дискриминатор в требуемый режим работы (режимы насыщения и пропорциональный режим работы).

IV. Результаты экспериментов

Для проверки разработанной модели ИЧФД, было проведено имитационное моделирование оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с помощью модели представленной на рис.8, построенной на базе линеаризованной математической модели [6].

В результате моделирования получены: фазовый портрет (рис. 5), временная диаграмма углового рассогласования (рис. 6) и временная диаграмма индикации моментов изменения углового рассогласования на величину φ_0 (рис. 7), соответствующую прохождению двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты. Полученные результаты полностью соответствуют теории прецизионного ССЭ и результатам компьютерного имитационного моделирования оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с применением модели учитывающей импульсный характер системы управления.

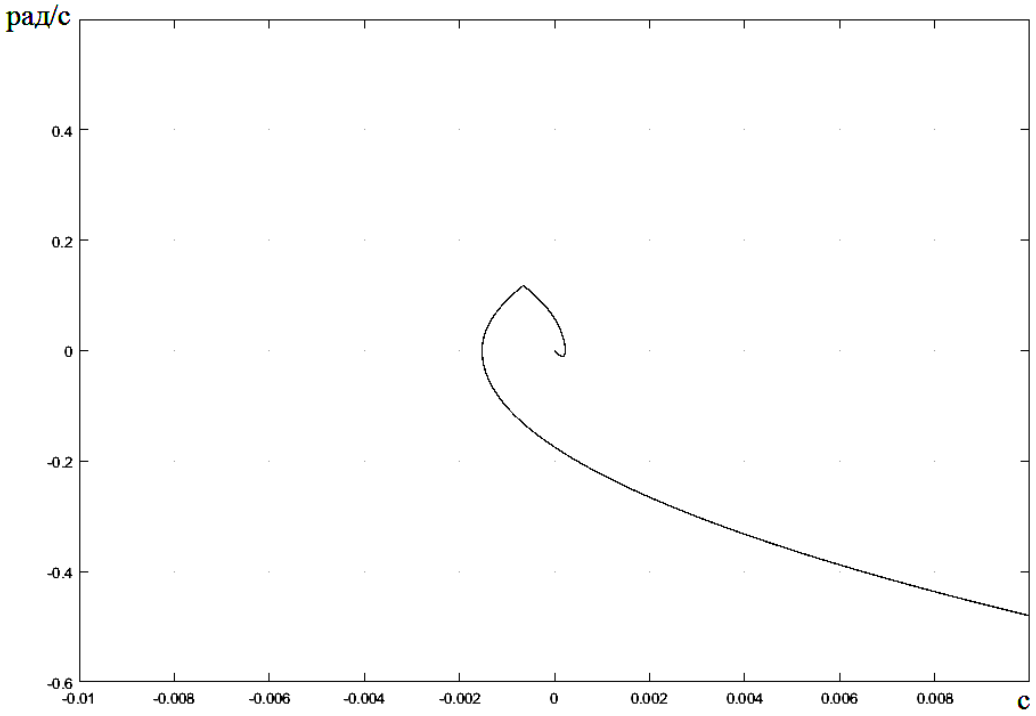


Рис. 5. Фазовые портрет синхронизации

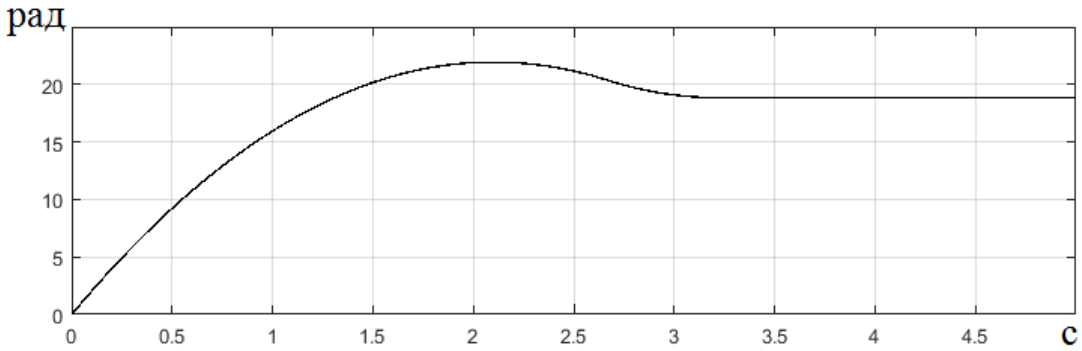


Рис. 6. Временная диаграмма углового рассогласования

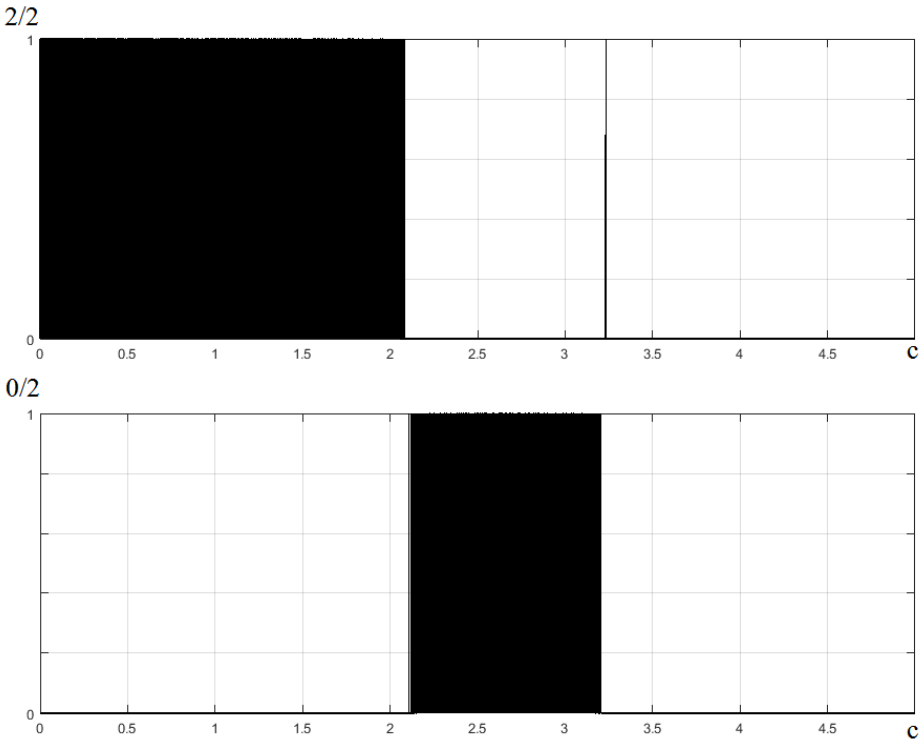


Рис. 7. Временная диаграмма индикации моментов изменения углового рассогласования на φ_0

На рис. 7 область закрашенная черным – это несколько тысяч импульсов, появляющихся на выходах 2/2 и 0/2 блока ИЧФД при изменении рассогласования по углу на φ_0. Эти импульсы могут использоваться для определения углового положения и угловой скорости электродвигателя.

V. Выводы и заключение

Разработанная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости, созданная на основе модели ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями, позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ и ЭПФС, способы управления электроприводом. При этом затрачивается на порядок меньше машинного времени, что ускоряет исследование ССЭ и ЭПФС в областях высоких частот вращения.

Список литературы

1. Бубнов А. В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянного тока: моногр. Омск, 2005. 190 с.

2. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor //Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330.

3. Lanza P. T., Shtessel Y. B., Stensby J. L. Improved acquisition in a phase-locked loop using sliding mode control techniques // Journal of the Franklin Institute. 2015. № 352 (10). С. 4188–4204.

4. Балковой А. П., Цаценкин В. К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 2010. 328 с.

5. Ramirez-Figueroa F. D., Pacas M. Model based control of a PMSM with variable switching frequency and torque ripple control // Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE. Yokohama, Japan, 2015. С. 1418–1423.

6. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 104 с.

УДК 62-83

ЭЛЕКТРОПРИВОД С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ С ОРГАНИЗАЦИЕЙ ОТРАБОТКИ ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛА ЗАДАНИЯ В РЕЖИМЕ ЗАМКНУТОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов В. И. Шпинева
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Электропривод с фазовой синхронизацией находит широкое применение при построении узла оптико-механической развертки тепловизионных и лазерных сканирующих систем. Целью статьи является улучшение динамических показателей электропривода путем разработки способа регулирования ЭПФС, реализованного на основе БЗЧ с дополнительным контуром регулирования и ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения входных импульсных сигналов логического устройства сравнения. Для улучшения динамических показателей электропривода в области высоких частот вращения предложены технические решения по построению ЭПФС с использованием улучшенных алгоритмов работы блока задания частоты и логического устройства сравнения.**

Ключевые слова: блок задания частоты, импульсный частотно-фазовый дискриминатор, логическое устройство сравнения, электропривод с фазовой синхронизацией.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-65-69

I. Введение

В тепловизионных и лазерных сканирующих системах при построении узла оптико-механической развертки используется стабилизированный электропривод, к которому предъявляются высокие требования к показателям качества функционирования. Электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), построенный на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1], позволяет обеспечить высокие точностные и динамические показатели в широком диапазоне регулирования угловой скорости, превосходящие показатели цифровых и аналоговых систем автоматического управления (САУ).

В электроприводе, построенном на основе принципа ФАПЧ, в качестве сигнала задания угловой скорости используется частотный сигнал $f_{оп}$, формируемый с помощью прецизионного генератора, в блоке задания частоты (БЗЧ); в качестве сигнала обратной связи – частотный сигнал $f_{ос}$, формируемый на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а в качестве сравнивающего элемента – логическое устройство сравнения (ЛУС) частот и фаз входных частотных сигналов, формирующее выходной сигнал γ. (рис. 1, где КУ – корректирующее устройство, СП – силовой преобразователь, ЭД – электродвигатель, *N* – код задания опорной частоты). В качестве ЛУС широкое использование находит импульсный частотно-фазовый дискриминатор (ИЧФД).

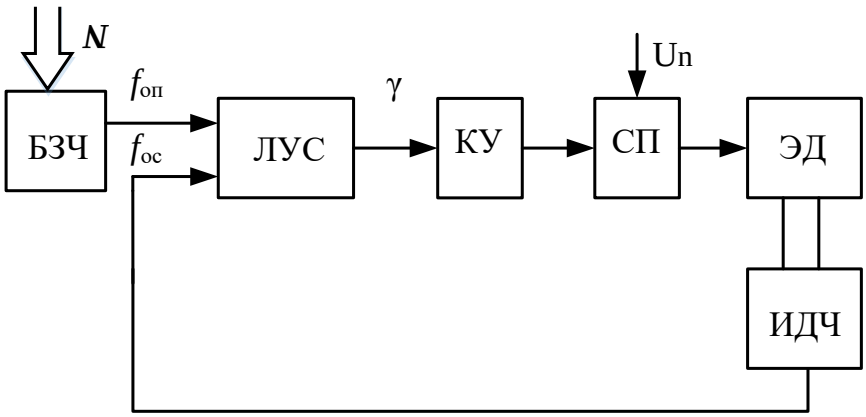


Рис. 1. Функциональная схема ЭПФС

Основным недостатком представленной функциональной схемы является наличие перерегулирования по угловой скорости в режимах синхронизации ЭПФС, обусловленного свойством систем, построенного на основе принципа ФАПЧ. Для уменьшения величины перерегулирования широко используется система управления с организацией опережающей разблокировки ЛУС по сигналу $У_П$ (рис. 2), формируемому с помощью дополнительного частотного дискриминатора (ЧД) и одновибратора (ОВ) [2].

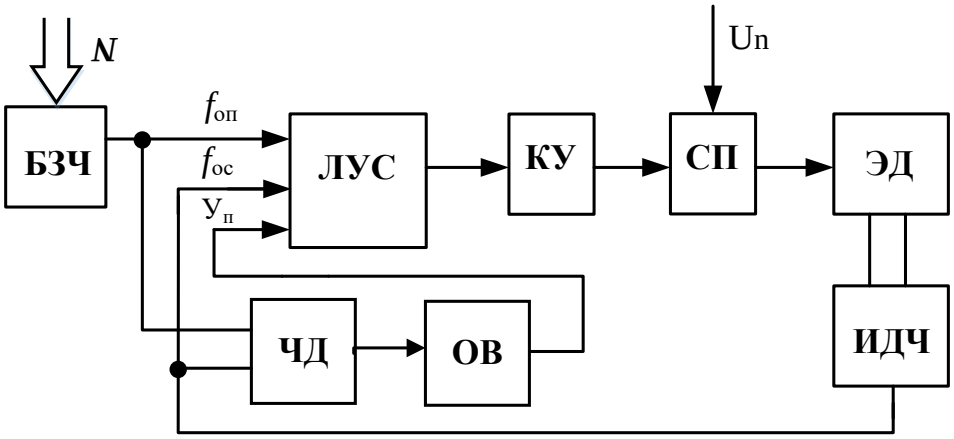


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией
с опережающей разблокировкой логического устройства сравнения

Способ регулирования ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС поясняется фазовым портретом работы электропривода, представленным на рис. 3. Для большей наглядности и удобства сравнения способов на рисунке приведены две фазовые траектории:

– траектория, обозначенная цифрами 1-2-3-4-5, соответствует работе ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД (рис. 1),

– траектория, обозначенная цифрами 1′-2′-3′-4′, соответствует работе ЭПФС с опережающей разблокировкой ИЧФД (рис. 3).

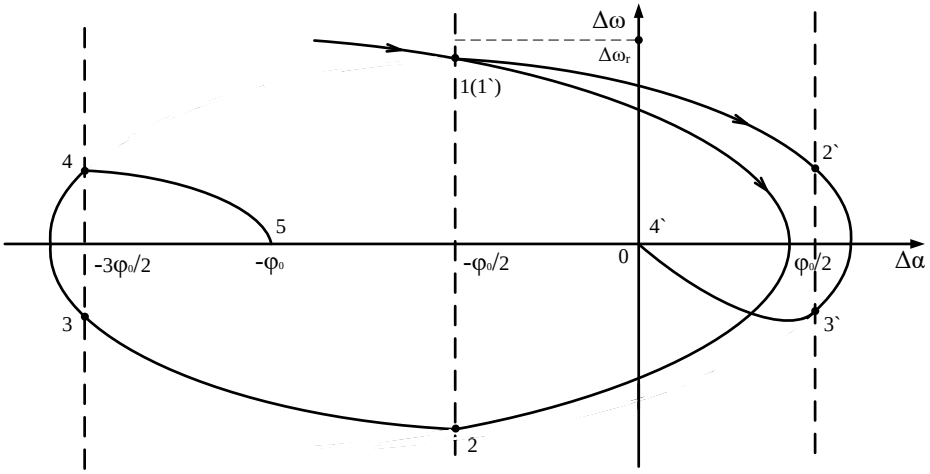


Рис. 3. Фазовый портрет работы электропривода с опережающей разблокировкой ИЧФД

Движение изображающей точки на фазовом портрете до точки 1 на линии переключения происходит в режиме разгона ЭПФС. Далее при обычном алгоритме работы ИЧФД режим разгона продолжается до изменения знака ошибки по угловой скорости и пересечения линии переключения в точке 2. Участок траектории 2-3 соответствует переходу ИЧФД в режим фазового сравнения (режим замкнутого управления). Точка 3 на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов 2/2, в результате ЭПФС переходит в режим торможения (участок фазовой траектории 3-4). Точка 4 на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов 0/2, в результате ИЧФД переходит в режим фазового сравнения, а ЭПФС – в режим синхронизации (участок фазовой траектории 4-5).

В случае использования способа управления ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС в точке 1′ ИЧФД по сигналу $У_п$ с ЧФ принудительно переводится в режим фазового сравнения, а электропривод переходит в режим замкнутого управления (участок фазовой траектории 1′-2′). Точка 2′ на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов 0/2, в результате ЭПФС переходит в режим разгона

(участок фазовой траектории 2′-3′). Точка 3′ на линии переключения соответствует ситуации взаимного расположения импульсов 2/2, в результате ИЧФД переходит в режим фазового сравнения, а ЭПФС – в режим синхронизации (участок фазовой траектории 3′-4′).

Сравнение фазовых траекторий, приведенных на рис. 3, позволяет оценить сокращение времени переходного процесса синхронизации ЭПФС при использовании способа управления ЭПФС с опережающей разблокировкой ЛУС. Выигрыш по времени определяется участком фазовой траектории 1-2 работы ЭПФС при обычном алгоритме работы ЛУС и составляет

$$0 < t_э \le 4\varphi_0 / \Delta\omega_r ,$$

где $\varphi_0 = 2\pi/z$ – угловое расстояние между метками ИДЧ, z – количество меток ИДЧ, $\Delta\omega_r = \sqrt{2\varphi_0\varepsilon_m}$ – максимальное значение ошибки по угловой скорости при переходе электропривода в режим синхронизации, ε_m – максимальное ускорение электропривода в режимах насыщения ЛУС.

II. Постановка задачи

Целью статьи является улучшение динамических показателей электропривода путем разработки способа регулирования ЭПФС, реализованного на основе БЗЧ с дополнительным контуром регулирования и ИЧФД с расширенной линейной зоной в режиме фазового сравнения входных импульсных сигналов ЛУС.

III. Теория

В обзорно-поисковых системах, реализующих метод бескадрового непрерывно-построчного сканирования и расположенных на автономных объектах, существует необходимость дискретного изменения сигнала задания $f_{ОП}$ при изменении условий сканирования [3]. В области малых значений *N* изменение кода задания на 1 приводит к переходу ИЧФД в режим насыщения, в результате электропривод переходит в режим разомкнутого управления. После отработки изменения сигнала задания требуется повторная синхронизация ЭПФС, что снижает быстродействие электропривода и приводит к потере информации в переходных режимах работы сканирующей системы. Для устранения данного недостатка предлагается алгоритм работы и техническая реализация БЗЧ с более плавным изменением кода задания *N* путем чередующегося изменения кодов *N* и *N-1* при увеличении сигнала $f_{ОП}$ и кодов *N* и *N+1* при уменьшении сигнала $f_{ОП}$. Функциональная схема электропривода с предлагаемой реализацией БЗЧ [4] приведена на рис. 4, где ПК – преобразователь кода, ДЧ – делитель частоты, Г – генератор.

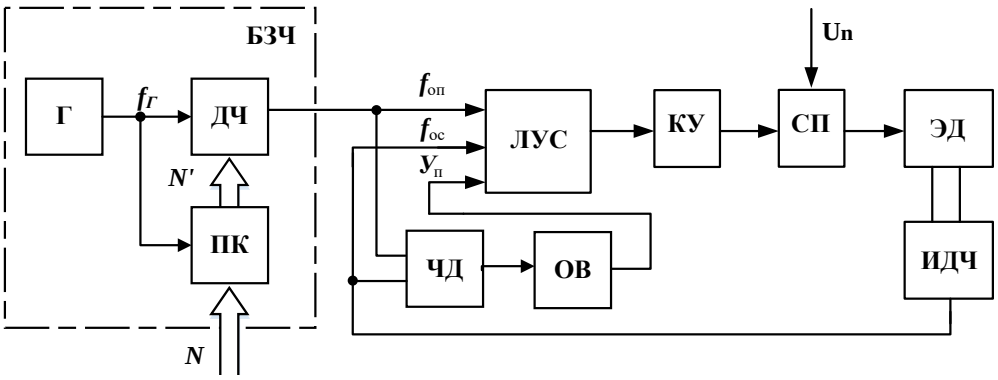


Рис. 4. Функциональная схема электропривода с реализацией блока задания частоты

При включении питания двигатель начинает разгоняться до синхронной скорости. При этом, через преобразователь кода на вход делителя частоты подается значение коэффициента деления *N* без корректировки его значения. В результате на выходе делителя частоты формируется импульсный сигнал с частотой $f_{оп}$, пропорциональной заданной угловой скорости электродвигателя. На входы ЛУС поступают сигнал задания $f_{оп}$ с выхода БЗЧ, и сигнал обратной связи $f_{ос}$, поступающий с выхода ИДЧ. При пуске электропривода частота $f_{оп}$ значительно превышает частоту $f_{ос}$, что определяет высокий уровень сигнала на выходе ЛУС, который, поступая на вход статического преобразователя, усиливающего и преобразующего управляющий сигнал в требуемый ток в обмотках ЭД, обеспечивает разгон электродвигателя с максимальным ускорением.

Частотный дискриминатор служит для определения момента времени, когда ошибка по угловой скорости $\Delta\omega$ становится меньше $\Delta\omega_г$, и для формирования в этот момент времени на выходе одновибратора сигнала $У_п$, с помощью которого осуществляется разблокировка ЛУС в режим фазового сравнения. Электропривод переходит в режим синхронизации и далее в синхронный режим работы.

Работа электропривода при изменении сигнала $f_{оп}$ выходе БЗЧ происходит следующим образом. Если разница между начальной и конечной заданной угловой скоростью меньше $\Delta\omega_г$, то отработка рассогласования по угловой скорости происходит без размыкания системы автоматического управления путем переключения делителя частоты на работу с новым коэффициентом деления N_{i+1}.

При малых значениях коэффициента деления N (в области высоких частот вращения) изменение выходной частоты $f_{оп}$ при изменении N на единицу может превышать допустимое значение (разница между начальной и конечной заданной угловой скоростью при этом получается больше $\Delta\omega_г$). В этом случае предлагается использовать промежуточные значения частоты $f_{оп}$, соответствующие дробным значениям коэффициента деления N. Их предлагается получать путем поочередного переключения между N_i и N_{i+1} , отличающимися на 1. В ПК, исходя из начальной и конечной угловой скорости и параметров электродвигателя, рассчитывается требуемый алгоритм изменения коэффициентов деления N, необходимый для организации переходного процесса без размыкания САУ[5]. Далее, рассчитанная последовательность коэффициентов деления N подается на делитель частоты. На выходе делителя частоты формируется задающий сигнал частоты $f_{оп}$, который обеспечивает плавный разгон (торможение) электропривода без выхода из пропорционального режима работы при отработке изменения сигнала задания.

В результате в стабилизированном электроприводе обеспечивается переход электропривода с одной угловой скорости (N_i) на другую ($N_{i+1}= N_i\pm1$) без размыкания системы автоматического управления.

Рассмотренная реализация ЭПФС позволяет расширить диапазон изменения N в область малых значений, что позволяет в данной области обеспечить отработку электроприводом изменения задающего сигнала без выхода САУ в режим разомкнутого управления.

Дальнейшее расширение диапазона изменения N в область малых значений позволяет обеспечить использование ИЧФД с расширенной линейной зоной [6]. Функциональная схема электропривода с предлагаемой реализацией ИЧФД [7] приведена на рис. 5.

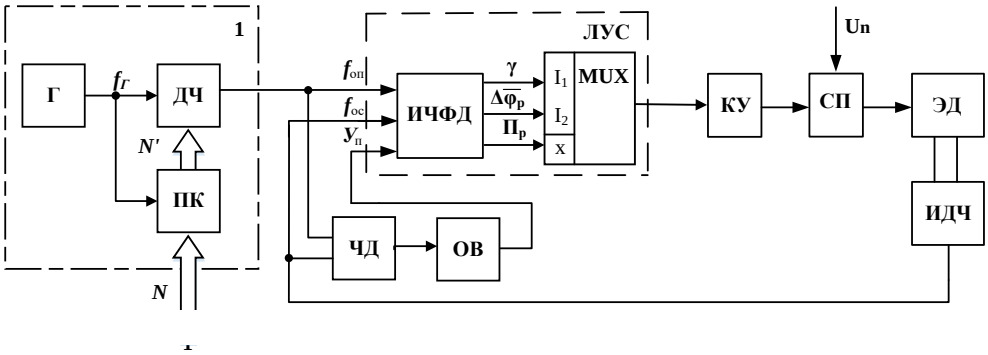


Рис. 5. Функциональная схема электропривода
с реализацией импульсного частотно-фазового дискриминатора

Линейная зона формирования угловой ошибки $\Delta\alpha$ электропривода на выходе ИЧФД в режиме фазового сравнения находится в диапазоне угловой ошибки $-\varphi_0/2<\Delta\alpha< \varphi_0/2$. При реализации режимов программного управления электроприводом при отработке изменения сигнала задания (в области малых значений коэффициента деления N в БЗЧ) электропривод выходит из синхронного режима и переходит в режим разгона или торможения, что требует последующий синхронизации ЭПФС и отрицательно сказывается на динамических показателях электропривода в переходных режимах работы.

Для улучшения динамических показателей электропривода предлагается реализация ЛУС в виде последовательно соединенных ИЧФД с расширенной в 3 раза линейной зоной $-3\varphi_0/2<\Delta\alpha< 3\varphi_0/2$ и мультиплексора. Мультиплексор служит для коммутации входных информационных сигналов γ и $\Delta\overline{\varphi}_p$ (выходной сигнал ИЧФД в режиме работы с расширенной линейной зоной) в зависимости от управляющего сигнала $П_р$, являющегося индикатором работы ИЧФД в режиме расширенной линейной зоны. При этом в режимах разгона и торможения электропривода на выход мультиплексора проходит сигнал γ с первого выхода ИЧФД, а в режиме синхронизации электропривода (режим замкнутого управления) – сигнал $\Delta\overline{\varphi}_p$, пропорциональный угловой ошибке в режиме расширенной линейной зоны ИЧФД.

В результате обеспечивается расширенный в 3 раза диапазон регулирования угловой ошибки, что позволяет реализовать режимы отработки изменения сигнала задания в области малых значений кода задания N без выхода электропривода из синхронного режима.

IV. Выводы и заключение

Предложенные технические решения по построению ЭПФС позволяют расширить диапазон регулирования ЭПФС в область высоких частот вращения, обеспечивая реализацию переходного режима работы при изменении сигнала задания без размыкания САУ и, соответственно, высокие динамические показатели регулирования.

Рассмотренные схемные реализации электропривода могут эффективно применяться при построении ЭПФС и синхронно-синфазных электроприводов (ССЭ) с улучшенными динамическими показателями в режимах синхронизации и фазирования. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании современных ССЭ для сканирующих и обзорно-поисковых систем.

Список литературы

1. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 169 с.
2. Бубнов А. В., Четверик А. Н. Разработка способов управления электроприводом с фазовой синхронизацией с улучшенными динамическими показателями // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2016. № 5 (149). С. 62–67.
3. Ясинский Г. И., Быстров А. М., Трахтенберг Р. М. Анализ и систематизация требований к электроприводам оптико-механических сканирующих систем // Усовершенствование и автоматизация промышленных электроприводов и электроустановок. 1980. С. 73–75.
4. Пат. 187266 Российская Федерация, МПК H 02 P 7/28, 7/25, 7/292. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А.Н. № 2018143345; заявл. 07.12.18; опубл. 27.02.19, Бюл. № 6.
5. Бубнов А. В., Бубнова Т. А. Способ регулирования синхронно-синфазного электропривода при ступенчатом изменении сигнала задания частоты вращения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 1. С. 44–48.
6. Пат. 2647678 Российская Федерация, МПК H 03 D 13/00, H 03 L 7/091. Частотно-фазовый компаратор / Бубнов А. В., Четверик А. Н. № 2017120667; заявл. 13.06.17; опубл. 16.03.18, Бюл. № 8.
7. Пат. 188026 Российская Федерация, МПК H 02 P 7/285, 7/292, G 05 B 11/36. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Четверик А. Н. , Чудинов А.Н., Ганин В. В., Шпинева В. И. № 2018146875; заявл. 27.12.18; опубл. 27.03.19, Бюл. № 9.

УДК 620.9

ЖАРОТРУБНЫЙ КОТЁЛ

А. С. Емельянов, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Котельная техника малой мощности в России представлена в основном жаротрубными котлами. Экономическая целесообразность и простота конструкции жаротрубных котлов привели их к более широкому применению. В статье указаны факторы, влияющие на надёжность, энергетическую эффективность, снижение выбросов токсичных веществ в котлоагрегатах данного типа. Проанализированы конструкции двухходового и трёхходового типа. Рассмотрены зависимости КПД от нагрузки и теплоты, влияние тепловых потерь, определяющие характер изменения КПД.**

Ключевые слова: котёл, КПД, факторы.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-69-72

I. Введение

Современная котельная техника малой и средней производительности развивается в следующих направлениях:

- повышение энергетической эффективности путём всемерного снижения тепловых потерь и наиболее полного использования энергетического потенциала топлива;
- уменьшение габаритов котельного агрегата за счёт интенсификации процесса сжигания топлива и теплообмена в топке и поверхностях нагрева;

• снижение вредных токсичных выбросов (CO, NO_x,SO_x);
• повышение надёжности работы котельного агрегата
Этим требованиям отвечают жаротрубные котлы.

II. Постановка задачи

На основании теплового баланса вычисляются КПД и необходимый расход топлива при сжигании 1 кг жидкого или 1 $м^3$ газообразного топлива при 0°С и 760 мм рт. ст.

Низшая теплота сгорания топлива соответствует тому количеству теплоты, которое выделяется при полном сгорании, без учёта теплоты конденсации водяного пара. Теплоту конденсации водяных паров также называют скрытой теплотой сгорания.

Высшей теплотой сгорания топлива называют количество тепла, выделяющееся при полном сгорании топлива и при условии конденсации образующихся в продуктах сгорания водяных паров.

Коэффициентом полезного действия отопительного котла называют отношение полезной теплоты, израсходованной на выработку пара (или горячей воды), к располагаемой теплоте отопительного котла. Не вся полезная теплота, выработанная котельным агрегатом, направляется потребителям, часть теплоты расходуется на собственные нужды. С учетом этого различают КПД отопительного котла по выработанной теплоте (КПД-брутто) и по отпущенной теплоте (КПД-нетто).

По разности выработанной и отпущенной теплоты определяется расход на собственные нужды. На собственные нужды расходуется не только теплота, но и электрическая энергия (например, на привод дымососа, вентилятора, питательных насосов, механизмов топливоподачи), т.е. расход на собственные нужды включает в себя расход всех видов энергии, затраченных на производство пара или горячей воды.

В итоге КПД-брутто отопительного котла характеризует степень его технического совершенства, а КПД-нетто – коммерческую экономичность. Для котельного агрегата КПД-брутто, %:

по уравнению прямого баланса:

$$\eta_{бр} = 100*(Q_{пол} / Q_р^р * B)$$

где $Q_{пол}$ – количество полезно используемой теплоты, МДж/кг; $Q_р^р$ - располагаемая теплота, МДж/кг; В –расход топлива,$м^3$/с по уравнению обратного баланса:

$$\eta_{бр} = 100 – (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

где q – потери тепла в %:q_2 – с уходящими газами;q_3 – из-за химического недожога горючих газов;q_4 – с механическим недожогом;q_5 – от наружного охлаждения;q_6 – с физическим теплом шлаков.

Тогда КПД-нетто отопительного котла учитывает КПД котла и расход энергии на вспомогательное оборудование.

Определение КПД по уравнению прямого баланса проводят преимущественно при отчетности за отдельный период (декада, месяц), а по уравнению обратного баланса – при испытании отопительного котла.

III. Теория

В газотрубных котлах горячие газы движутся внутри труб, омываемых снаружи водой.

Компоновку котлов такого типа принято классифицировать как двухходовую и трёхходовую. Первым ходом считается развитие факела и движение продуктов сгорания по топочному объему, которое, в свою очередь, бывает без разворота факела – проточным (рис. 1а) и реверсивным, т.е. с разворотом факела на 180° в тыльной части жаровой трубы – для тупиковых топок (рис. 1б). Далее двухходовые схемы предполагают один ход продуктов сгорания по конвективным дымогарным трубам (рис. 1б), а трёхходовые (рис. 1.1а) – два хода с разворотом продуктов сгорания между пучками дымогарных труб на 180°.

Конструкция трёхходового котла, по сравнению с двухходовым, имеет большую конвективную поверхность нагрева (дымогарных труб) и за счёт этого позволяет увеличить степень охлаждения дымовых газов. Использование тупиковых жаровых труб с реверсивным факелом имеет ряд преимуществ по отношению к проточной конструкции. Во-первых, при развороте факела обеспечивается интенсификация конвективного теплообмена в топке и достигается более равномерное распределение тепловых потоков через поверхность стен жаровой трубы. Во-вторых, за счет активной рециркуляции части продуктов сгорания к корню факела горелки снижается выпуск оксидов азота. И, в-третьих, фиксация тупиковой жаровой трубы на трубной доске лишь с одного конца обеспечивает независимую самокомпенсацию тепловых расширений топки.

IV. Результаты экспериментов

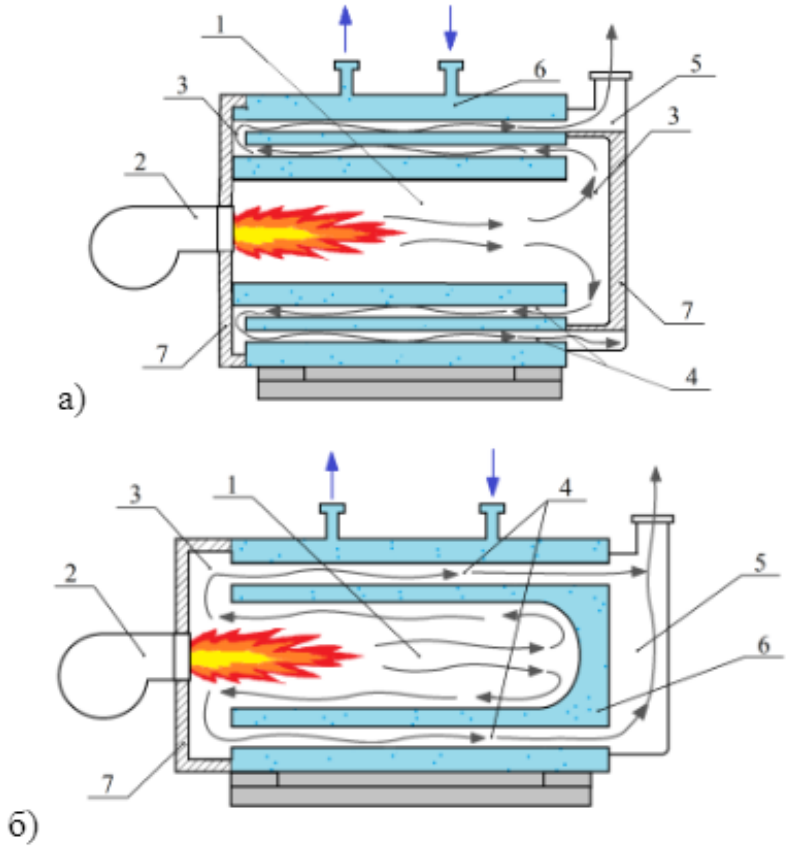


Рис. 1. Конструктивная схема котла с проточной (а) и тупиковой (б) жаровой трубой:
1 – жаровая труба; 2 – горелка; 3 – поворотная камера; 4 – конвективный пучок дымогарных труб;
5 – сборный дымовой короб; 6 –водяной объем; 7 – изоляция

V. Обсуждение результатов

Недостатки жаротрубных конструкций обусловлены малой скоростью движения теплоносителя во внутреннем водяном объеме котла, имеющем большое расчетное живое сечение. Такая гидродинамика приводит к интенсивному выпадению взвешенных частиц шлама, как в нижней части водяного объема, так и на верхней образующей жаровых труб. Отложения, прежде всего, влияют на эффективность теплопередачи от дымовых газов к теплоносителю и, следовательно, приводят к росту температуры на выходе из котла, чем снижают его мощность и КПД. Отложения, прежде всего, влияют на эффективность теплопередачи от дымовых газов к теплоносителю и, следовательно, приводят к росту температуры на выходе из котла, чем снижают его мощность и КПД.

Котлы выпускаются теплопроизводительностью от 125 до 3000 кВт. Жаротрубные котлы считаются взрывоопасным оборудованием, имеют большой водяной объем, жесткие требования к качеству воды, значительную инерционность в наборе и снижении нагрузки, высокую металлоёмкость и возможность работы при низких давлениях воды, не более 0,7Мпа.

К числу достоинств относят высокую аккумуляционную способность из-за большого запаса воды внутри котла, что удобно при резких изменениях расхода горячей воды.

VI. Выводы и заключение

Из анализа тепловых потерь следует, что величина ряда из них существенно и по-разному зависит от избытка воздуха. К ним относятся потери q_2, q_3, q_4.В связи с этим возникает необходимость в установлении оптимального избытка воздуха в топке $\alpha_т^{опт}$, обеспечивающего минимум суммарных потерь. При этом потерю q_2 относят к значению $\alpha_т$, поскольку присосы по газоходам известны. При сжигании газа и мазута определяющими экономичность котла являются потери q_2+q_3, а в случае сжигания твёрдого топлива-q_2+q_4.

В итоге на современных паровых котлах превалирующей является потеря с уходящими газами q_2 ,которая в основном и определяет характер изменения КПД котла от нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумейко А. В. Оптимизация конструкции и режимов работы газовоздушных теплогенераторов и жаротрубно-дымогарных водогрейных котлов: дис. … к-та техн. наук. Екатеринбург, 2005. 165 с.
2. URL: http://kotlomaniya.ru/kotly/zharotrubnye-parovye-kotly.html.
3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-rezhimov-energeticheskih-kotlov-pri-szhiganii-ver.
4. URL: http://akz22.ru/kotel-zhar.
5. Васильев А. В., Антропов Г. В., Баженов А. И. [и др.]. Повышение надежности жаротрубных водогрейных котлов // Промышленная энергетика.1998. № 7. С. 28–32.

УДК 621.43 + 621.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИССЛЕДОВАННЫХ РАНЕЕ ВИДОВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В УПРОЩЕННОЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА И ПОЛНОЦЕННОЙ МОДЕЛИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

А. М. Калашников, И. Д. Обухов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной работе выполнено сравнение эффективности теплообменной изоляции относительно исследованной ранее упрощенной модели проточной части теплообменного аппарата и новой модели полноценного рекуперативного теплообменника на базе существующей мобильной компрессорной установки, с применением ранее разработанной методики численного анализа при помощи Ansys (Fluid Flow - Fluent). Объектом исследования являются две конструкции, одна из которых состоит из двух коаксиальных трубок, между которыми протекает горячий газ (выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания), а по осевому каналу течёт вода, а вторая представляет собой трубный пучок, в котором движется вода, соединенного с двух сторон зоной смешения и внешнего кожуха, в котором движутся выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания. На внешней поверхности обоих конструкций были размещены твердые теплоизолирующие материалы. В исследовании рассматривались наиболее эффективные виды твердой теплоизоляции: базальтовое супертонкое волокно, вспененный каучук, пенополиуретан. Проведенный с Ansys (Fluid Flow - Fluent) сравнительный анализ эффективности подобранной теплоизоляции применительно к упрощенной модели теплообменного аппарата и полноценной модели рекуперативного теплообменного аппарата показал рост эффективности теплоизоляции применительно к реальной конструкции теплообменного аппарата.**

Ключевые слова: тепловая эффективность, теплообменный аппарат, рекуперация, тепловые потери.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-72-76

I. ВВЕДЕНИЕ

В проведенных ранее исследовании было продемонстрированно, как значительная часть генерируемой в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) энергии, направляемой на сжатие газа в мобильной компрессорной установке (МКУ), отводится в атмосферу [1]. Используя систему рекуперации этих тепловых потерь, становится возможным обеспечить их частичный возврат в технологическую схему МКУ, при этом существенное влияние на термодинамическую эффективность системы рекуперации на базе цикла Ренкина оказывает конструкция рекуперативного теплообменного аппарата (ТА) [1–4]. Результаты проведенных ранее исследований упрощённой схемы «труба в трубе» позволили установить степень влияние внешней изоляции на величину тепловых потерь в окружающую среду [5]. Однако применительно к другому конструктивному исполнению ТА соотношение площадей полезной теплообменной поверхности и поверхности обечайки могут иметь существенное различия. Помимо этого, рабочее давление горячего газа в проточной части рекуперативного ТА будет зависеть от рабочего перепада давления на расширительной машине, что не может не отразиться на тепловых потерях ТА и его удельных характеристиках. Именно эти факторы и рассмотрены в данной статье.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе выполнено сравнение эффективности теплообменной изоляции относительно первоначальной упрощенной модели проточной части ТА (рис. 1) и новой модели полноценного рекуперативного ТА

на базе существующей МКУ (рис. 2), с применением ранее разработанной методики численного анализа при помощи Ansys (Fluid Flow - Fluent).

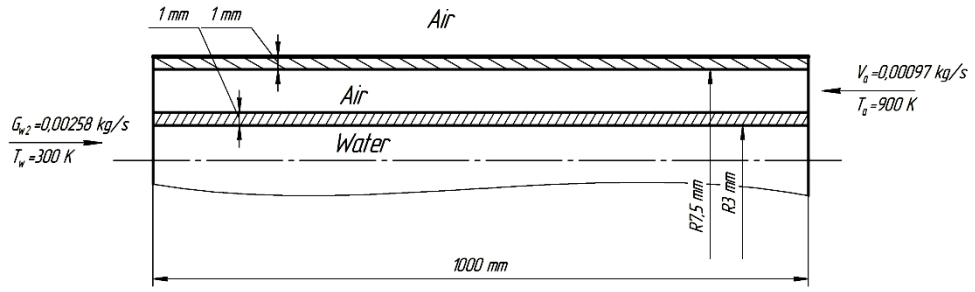


Рис. 1. Расчётная схема упрощенного прототипа проточной части ТА без наружной изоляции

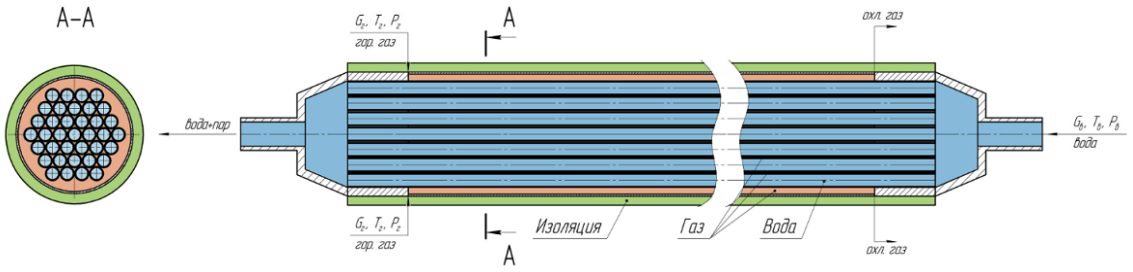


Рис. 2. Расчётная схема полноценного ТА без наружной изоляции

Исходя из результатов проведенных ранее исследований, для новой модели были отобраны наиболее эффективные виды твердой теплоизоляции: базальтовое супертонкое волокно (БСТВ), вспененный каучук (ВК), пенополиуретан (ППУ) [5–7].

Таким образом, объектом исследования являются две конструкции, одна из которых состоит из двух коаксиальных трубок, между которыми протекает горячий газ (выхлопные газы ДВС), а по осевому каналу течёт вода (рис. 1), а вторая представляет собой трубный пучок, в котором движется вода, соединенного с двух сторон зоной смешения и внешнего кожуха, в котором движутся выхлопные газы ДВС (рис. 2). На внешней поверхности обоих конструкций были размещены твердые теплоизолирующие материалы (рис. 3).

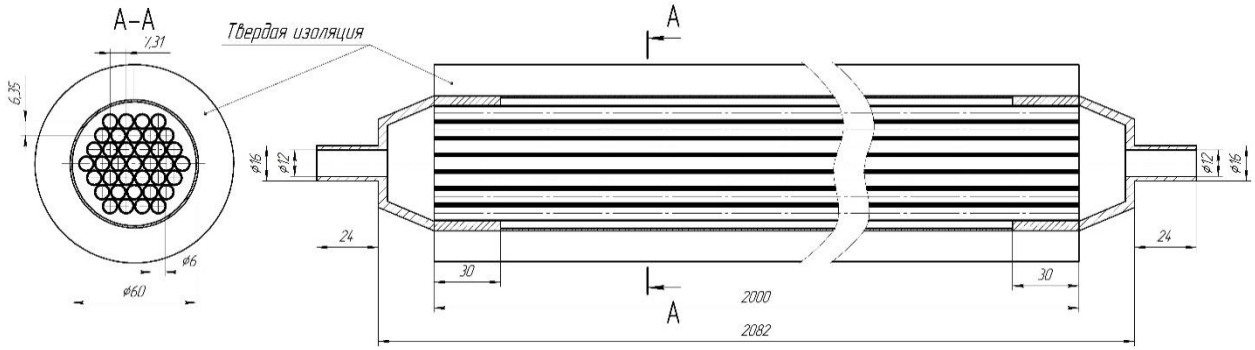


Рис. 3. Расчетная схема полноценного ТА с твердой изоляции

III. Теория

Моделирование теплообменных процессов в новом рекуперативном ТА проводился на базе уравнений теплопроводности, конвективного теплообмена и теплообмена излучением, содержащиеся в пакете Fluid Flow - Fluent [5]. При моделировании теплообменных процессов были приняты следующие граничные условия: температура горячего воздуха на входе Тг равная 550°С; температура воды на входе T_B равна 10°С; внешняя температура окружающей среды Тн равна 0°С. Коэффициент теплоотдачи α между окружающей средой и внешней поверхностью ТА считается постоянным.

IV. Результаты экспериментов

На рисунке 5 представлено распределение температуры внутри рекуперативного ТА изолированного ППУ.

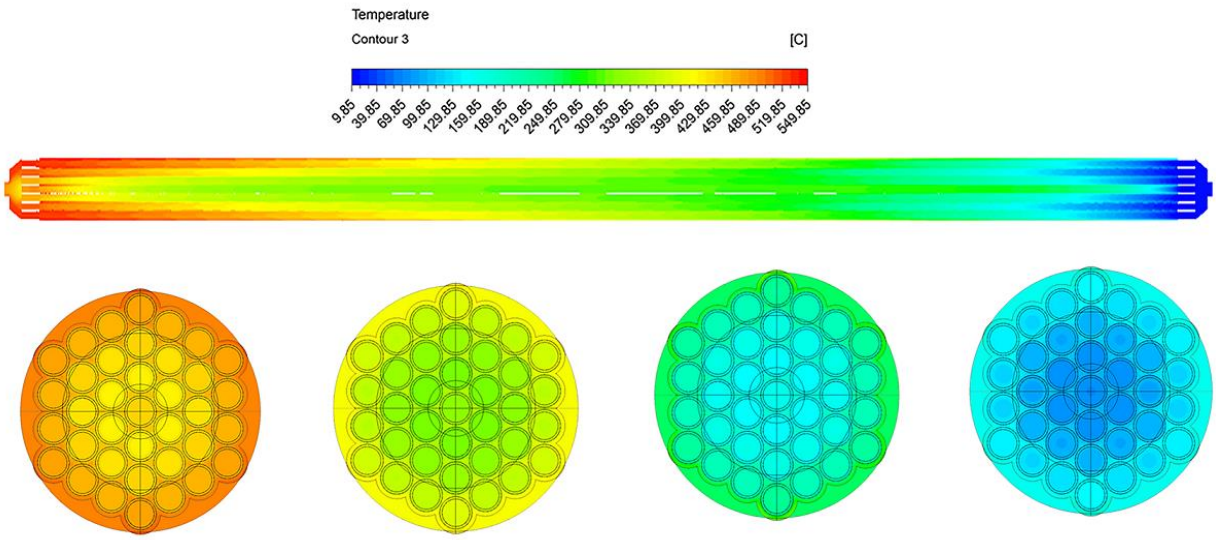


Рис. 4. Распределение температуры в ТА изолированного слоем ППУ (5 мм)

На рис. 5 представлено сравнение эффективности теплоизоляции в новом полноразмерном рекуперативном ТА и старом прототипа упрощенной модели проточной части ТА через зависимости относительных тепловых потерь в рассматриваемых объектах от толщины внешней изоляции для различных типов твёрдых теплоизоляционных материалов.

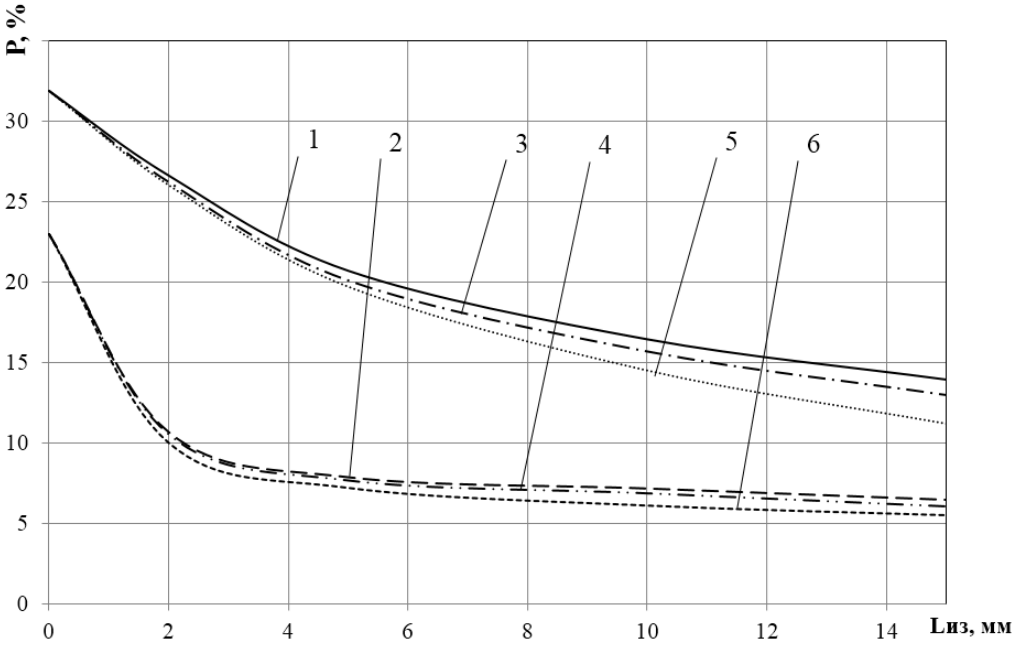


Рис. 5. Влияние толщины теплоизоляционного слоя на внешние тепловые потери:
1 – БСТВ (прототип); 2 – БСТВ (ТА); 3 – ВК (прототип); 4 – ВК (ТА); 5 – ППУ (прототип); 6 – ППУ (ТА)

На рис. 6 и 7 представлены графики, отражающие влияние роста давления газа в межтрубном пространстве на отношения тепла, переданного воде к площади теплообмена и отношения тепловых потерь к количеству тепла, переданного газом.

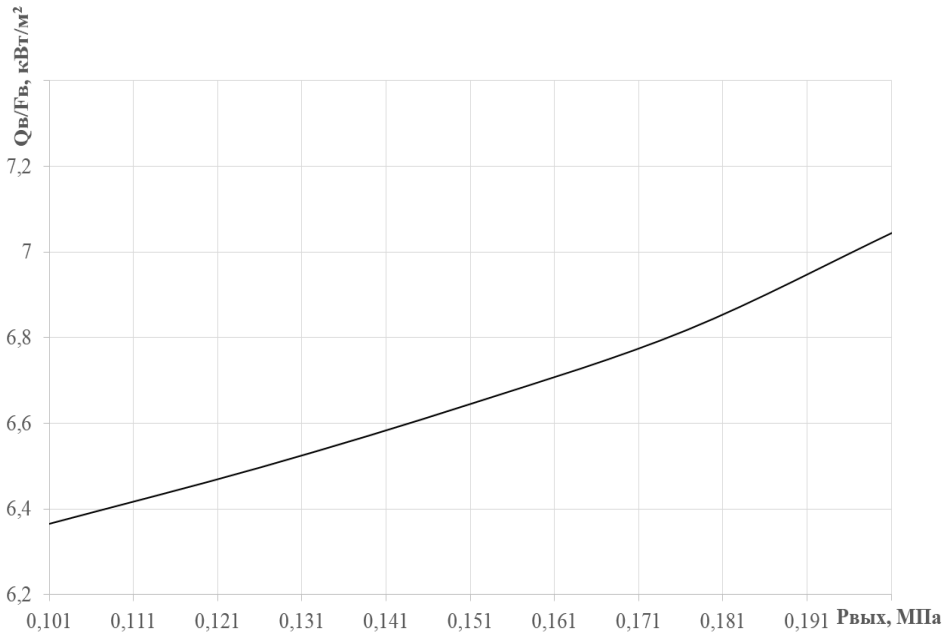


Рис. 6. График зависимости $Q_в/F_в$ от давления газа

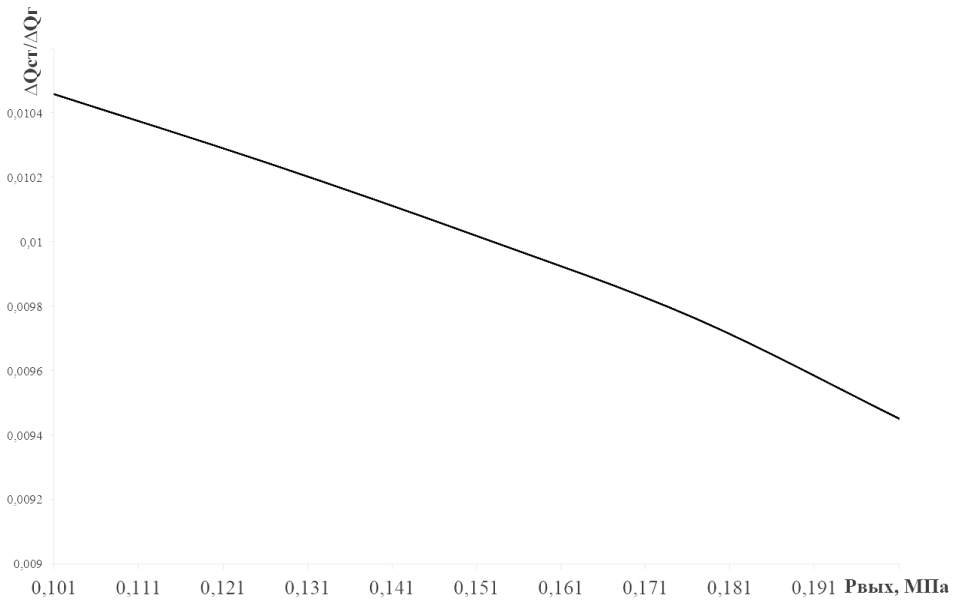


Рис. 7. График зависимости $\Delta Q_{ст}/\Delta Q_г$ от давления газа

V. Обсуждение результатов

На графике (рис. 5) видно, что в новом варианте конструкции при отсутствии теплоизоляционного слоя тепловые потери достигают 24,5%. Это значение ниже полученного в проведенных ранее исследования, когда вместо полноразмерной модели ТА использовался упрощенный вариант проточной части рекуперативного ТА, тогда значение тепловых потерь составляло 34% [5]. В обоих случаях с ростом толщины изоляции тепловые потери снижаются, с разной степенью интенсивности для разных типов изоляции. ППУ как и ранее показал наилучшие результаты и позволил снизить тепловые потери с ~12% до ~5,5% при длине теплоизоляционного слоя равного 15 мм. При этом в обоих случаях дальнейшее увеличение толщины изоляции не приносит существенного результата.

Из графиков на рис. 6–7, что с ростом давления происходит увеличение интенсивности теплообмена (около 11%), а значит, повышается эффективность рекуперативного ТА.

VI. Выводы и заключение

Выполненный с применением Ansys (Fluid Flow - Fluent) сравнительный анализ эффективности подобранной теплоизоляции применительно к упрощенной модели проточной части ТА и полноценной модели рекуперативного ТА на базе существующей МКУ показал рост эффективности теплоизоляции применительно к реальной конструкции ТА. На основе этого можно рекомендовать экранно-вакуумную изоляцию при разработке и исследовании перспективных рекуперативных ТА для высокоэкономичных МКУ.

Список литературы

1. Chernov G. I., Yusha V. L., Kalashnikov A. M. The heat losses recovery system efficiency analysis of the mobile compressor unit with the additional cooling loop // AIP Conference Procedings. 2018. Vol. 2007. DOI: 10.1063/1.5051892.

2. Chernov G. I., Yusha V. L., Sherban K. V., Kalashnikov A. M. Modeling of the processes of heating organic coolant in the system of heat losses recuperation of the mobile compressor unit on the basis of a low-speed single-stage // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 858. P. 226–232. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012008.

3. Bo Yang, Yi Jiang, Lin Fu, Shigang Zhang. Conjugate heat and mass transfer study of a new open-cycle absorption heat pump applied to total heat recovery of flue gas // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 138. P. 888–899.

4. Han Yuan, Pengyuan Sun, Ji Zhang, Kunyuan Sun, Ning Mei and Peilin Zhou Theoretical and experimental investigation of an absorption refrigeration and pre-desalination system for marine engine exhaust gas heat recovery // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 150. P. 224–236.

5. Chernov G. I., Yusha V. L., Kalashnikov A. M. The efficiency comparative analysis of the mobile compressor unit heat losses recovery system flow part elements thermal insulation different types // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2007. DOI: 10.1063/1.5051890.

6. Архаров А. М. Теплотехника. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 712 с.

7. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.]. Физические величины. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

УДК 621.311

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ УСТРАНЕНИЯ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ДИСКРЕТНОМ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ ТОКА

Б. Ю. Киселёв, Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной работе изложены краткие теоретические положения, связанные с вейвлет преобразование непрерывным и дискретным. Описаны недостатки дискретного преобразования Фурье, при анализе нестационарных электроэнергетических сигналов. Рассмотрены все способы устранения краевого эффекта при обработке данных с помощью вейвлет-преобразования встроенных в программный комплекс Matlab. Произведено сравнения данных способов устранения краевого эффекта, посредством расчета действующих значений различных гармонических составляющих при разных способах увеличения длины реализации сигнала. Определены типы увеличения длины реализации данных вносящие наименьшую погрешность в расчет действующих значений гармонических составляющих тока.**

Ключевые слова: краевой эффект, гармоническая составляющая, дискретное вейвлет преобразование.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-76-80

I. Введение

Самым распространённым математическим аппаратом для обработки цифровых сигналов в энергетике является дискретное преобразование Фурье (ДПФ; английский термин – Discrete Fourier Transform, DFT) [1]. При анализе стационарных сигналов ДПФ даёт довольно хорошие результаты. Однако, если сигнал будет нестационарным то такой подход вносит погрешность в расчеты, связанную с отсутствием локализации базисных функций преобразования Фурье. Появляется так называемый «эффект растекания спектра», что приводит к появлению сложного спектра на месте одного узкого пика. В этом случае применение ПФ не рекомендуется.

Для уменьшения эффекта растекания спектра при ДПФ используются различные подходы, один из них основан на использовании "весовых" или оконных функций [1]. Однако здесь появляется проблема с выбором ширины оконной функции.

В настоящее время, в энергетике и в том числе для расчета нестационарных режимов систем электроснабжения (СЭС) находит широкое применение математический аппарат вейвлет-преобразование (ВП), Поскольку лишен ряда недостатков, присущих преобразованию Фурье [2–4]. Вейвлет-преобразование даёт возможность лучше рассмотреть элементы сигнала, присутствующие на коротком промежутке времени [5].

II. Теория

Основная суть вейвлет-преобразования заключается в том, что исходный сигнал i(t) скалярно умножается на систему базисных функций, в качестве этих самых базисных функций выступают вейвлеты [5].

$$C(a,b) = (i(t), \Psi_{ab}(t)), \tag{1}$$

где $i(t)$ – исследуемая функция;

$\Psi_{ab}(t)$ – анализирующая функция.

Основным свойством вейвлетов является их локализация (ограничение) по времени. Набор базисных функций получается путём сдвига во времени *b* и изменения временного масштаба *a*.

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \tag{2}$$

где $\frac{1}{\sqrt{a}}$ –обеспечивает независимость нормы функции от масштаба a.

$\psi(t)$ – функция материнского вейвлета.

Это выражение справедливо для непрерывного вейвлет-преобразования (НПВ). Оно позволяет получить трёхмерный спектр. Где наглядно представлены частоты, присутствующие в сигнале их время присутствия и масштаб (аналог амплитуде).

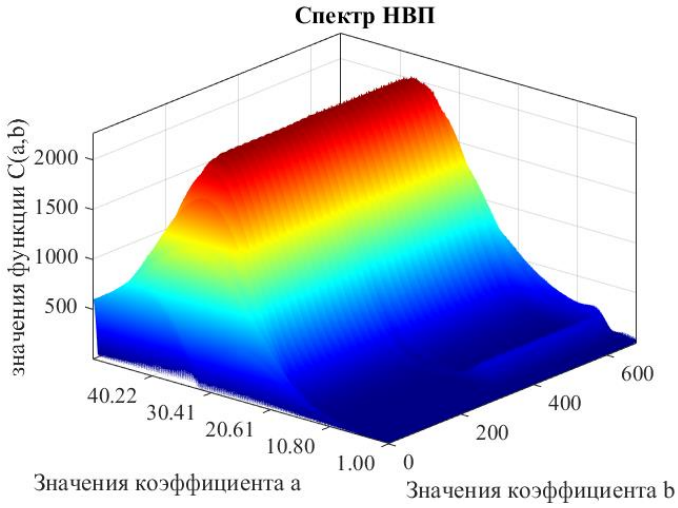


Рис. 1. Спектр непрерывного вейвлет-преобразования

Данный вид ВП является избыточным и требует большого количества математических операций. Поэтому на практике чаще всего применяются дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) и пакетное вейвлет преобразование (ПВП). Они осуществляются разложением исходной, анализируемой функции на составляющие

На основе теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) непрерывный сигнал тока i(t), спектр которого не содержит частот выше f_m, полностью может быть определён дискретной последовательностью своих мгновенных значений $\{i_k\}$= k=0, 1, ..., N-1, отсчитываемые через интервалы времени Δt [3]:

$$\Delta t = \frac{1}{2 f_m}, \; f_д = \frac{1}{\Delta t} = 2 f_m, \tag{3}$$

где Δt и f_m – интервал (шаг) и частота дискретизации.

Отсюда следует, что дискретизированный с шагом Δt сигнал можно определить выражением

$$i_д = \{i_i\} = \sum_{i=1}^{N-1} i(k\Delta t) \cdot \delta(t - k\Delta t), \tag{4}$$

где δt – дельта функция.

Выбрав частоту дискретизации $f_д$=800 Гц получаем дискретный сигнал тока. Скалярно перемножая его с масштабирующей функцией $\varphi(t)$, сдвигаемой по оси времени так, что бы она покрывала весь интервал времени, получим аппроксимирующие коэффициенты 1 уровня вейвлет-разложения $i^A_{1,k}$. Аналогичным образом перемножая дискретный сигнал тока на вейвлет функцию $\psi(t)$, получим детализирующие коэффициенты 1 уровня разложения $i^D_{1,k}$. Для дальнейшего разложения на 2, 3 и др. уровни разложения, необходимо получить по формулам 4,5 новый набор функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$.

$$\psi_{j,k}(t) = \sqrt{2^j} \cdot \psi(2^j t - k), \tag{5}$$

$$\varphi_{j,k}(t) = \sqrt{2^j} \cdot \varphi(2^j t - k),. \tag{6}$$

На практике для реализации данного преобразования существует алгоритм, названным быстрым вейвлет преобразованием (БВП) или алгоритмом Малла. Данный алгоритм даёт возможность вычислять вейвлет коэффициенты не прибегая к интегрированию. Для этого используются специальные коэффициенты фильтра или также их называют низкочастотным (НЧ) и высокочастотным (ВЧ) фильтрами [3].

Весь процесс разложения протекает по схемам, представленным на рис. 2, 3 [6]. Так же при выбранной частоте дискретизации, каждый из этих наборов вейвлет коэффициентов, на каждом уровне, будет отвечать за свой диапазон частот, как показано на рис. 2.

Рис. 2. Схема дискретного вейвлет-преобразования

III. Постановка задачи

При дискретном вейвлет разложении сигнал тока может быть записан через вейвлет коэффициенты.

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k_m} i^A_{j,k} \cdot \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=0}^{k_m} i^D_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \tag{7}$$

На основе равенства Парсеваля может быть вычислено действующее значение тока в заданном диапазоне частот.

В первый диапазон частот, аппроксимирующего коэффициента 2 уровня разложения попадает основная частота 50 Гц. Отсюда действующее значение основной частоты можно вычислить как [7]:

$$I1 = N^{-\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{k_m} \left(i_{2,k}^{A}\right)^2}, \tag{8}$$

где N – количество отсчетов исследуемого дискретного сигнала.

Действующие значения токов высших 3, 5 и 9 гармоник при дискретном вейвлет преобразовании могут быть вычислены соответственно через детализирующие коэффициенты 3, 2 и 1 уровней разложения.

$$I3 = N^{-\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{k_m} \left(i_{3,k}^{D}\right)^2}, \tag{9}$$

$$I5 = N^{-\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{k_m} \left(i_{2,k}^{D}\right)^2}, \tag{10}$$

$$I9 = N^{-\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{k_m} \left(i_{1,k}^{D}\right)^2}. \tag{11}$$

Из-за того, что высокочастотный и низкочастотный вейвлет фильтры не являются идеальными, на границе двух частотных коридоров, одна частотная полоса немного наслаивается на другую. Это в свою очередь приводит к погрешности в расчетах [8]. Что приводит к необходимости выбирать тот или иной тип вейвлета в зависимости от поставленной задачи. В данной работе погрешности от выбора типа вейвлета рассматриваться не будут.

Так же при дискретном или пакетном вейвлет преобразовании погрешность возникает из-за краевого эффекта, который появляется при недостаточной длине реализации сигнала. Для устранения этой погрешности существуют различные способы, позволяющие увеличить длину реализации сигнала. В рамках данной статьи будут рассмотрены способы, встроенные в программный комплекс MATLAB [9]:

- sym или sumh – симметричное заполнение по граничным значениям (полуточечное)
- symw – симметричное заполнение по граничным значениям (полное)
- asym или asymh – асимметричное заполнение по граничным значениям
- asymw – асимметричное заполнение по граничным значениям (полное)
- zpd – дополнение данных нулями
- spd или sp1 – интерполяция первого порядка
- sp0 – интерполяция нулевого порядка
- per – периодизация

Для того что бы выяснить какой из этих способов вносит меньшую погрешность в расчет, произведём расчет действующих значений тока разных частотных составляющих при разных типах увеличения длины реализации сигнала.

Для численного эксперимента зададим сигнал тока формулой

$$i(t) = \begin{cases} i(t) = 35 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot 50), \quad 0 < t < \frac{2}{3}; \\ i(t) = 35 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot 50) + \frac{35 \cdot \sqrt{2}}{3} \cdot \sin(\omega \cdot 150) + \frac{50 \cdot \sqrt{2}}{5} \cdot \sin(\omega \cdot 250) + \frac{35 \cdot \sqrt{2}}{9} \cdot \sin(\omega \cdot 450) \quad \frac{2}{3} < t < \frac{4}{3}; \\ i(t) = 35 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot 50), \quad \frac{4}{3} < t < 2; \end{cases} \tag{12}$$

где $\omega = 2\pi \cdot t$.

Данный сигнал тока содержит частоты 50, 150, 250 и 450 Гц. Далее производим дискретное вейвлет-преобразование исследуемого сигнала, разложив его на частотные диапазоны, для анализа используем вейвлет Добеши 40 порядка (db40), как наиболее точный.

IV. Результаты экспериментов

Произведя численный эксперимент, получили вычисленные аналитически действующие значения основной, третьей, пятой и девятой гармонической составляющей. Рассчитали действующие значения для основной, третьей, пятой и девятой гармонической составляющей через вейвлет коэффициенты при разных способах увеличения длины реализации сигнала тока. Также рассчитали погрешность между значениями гармонических составляющих вычисленных аналитическим способом и при помощи вейвлет коэффициентов. Все полученные значения сведены для наглядности в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Способ увеличения длины реализации сигнала	Действующие значения токов, посчитанные аналитически				Действующие значения токов, посчитанные через вейвлет коэффициенты				Погрешности расчетов действующих значений через вейвлет коэффициенты			
	I1, A	I3, A	I5, A	I9, A	IW1, A	IW3, A	IW5, A	IW9, A	E1, %	E3, %	E5, %	E9, %
sym (symh)	35	6,74	3,96	2,25	37.87	6.89	4.07	2.22	8.19	2.41	2.78	1.32
symw					37.87	6.91	4.07	2.22	8.19	2.72	2.84	1.25
asym (asymh)					37.55	7.97	4.34	2.31	7.29	18.42	9.65	3.07
asymw					85.47	6.89	4.06	2.21	144.2	2.33	2.65	1.33
zpd					34.98	6.85	4.08	2.24	0.053	1.63	3.13	0.19
spd (sp1)					42.53	6.82	4.06	2.22	21.51	1.18	2.63	1.33
sp0					35.51	6.8	4.06	2.22	1.47	1.26	2.65	1.31
per					35	6.79	4.19	2.24	0.002	0.80	5.9	0.08

V. Выводы и заключение

По полученным результатам можно сделать вывод, наиболее точным способом увеличения длины реализации сигнала является периодизация. Она даёт возможность с достаточной точностью рассчитывать действующие значения токов различных гармонических составляющих. Так же довольно хорошим способом является заполнение данных нулями. Остальные же способы увеличения длины реализации сигнала дают большие погрешности при расчете основной гармонической составляющей.

Список литературы

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. ПИТЕР, 2002. 608 с.

2. Мисриханов А. М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике // Автоматика и телемеханика. 2006. № 5. С. 5–23.

3. Карпенко С. В. Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: дис. … канд. техн. наук. Новокузнецк, 2006. 164 с.

4. Аббакумов А. А. Разработка методики и алгоритмов идентификации отклонений от нормативов параметров качества электроэнергии в системах электроснабжения: дис. … канд. техн. наук. Саранск, 2005. 180 с.

5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 464 с.

6. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.

7. Осипов Д. С., Коваленко Д. В., Киселёв Б. Ю. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет преобразования // Омский научный вестник. 2016. № 4(148). С. 84–89.

8. Киселёв Б. Ю., Коваленко Д. В. Сравнительный анализ типов вейвлетов на примере расчета действующих значений тока // Журнал научных и прикладных исследований. 2016. № 4–1. С. 140–143.

9. URL: https://www.mathworks.com/help/ (дата обращения: 04.03.2019).

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВО ВРЕМЕНИ СИГНАЛА ТОКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Д. В. Коваленко, Л. А. Файфер, Б. Ю. Киселев, В. Н. Горюнов, Е. П. Жиленко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе производилось разложение сигнала тока распределительной сети с классом напряжения 0,4 кВ с применением пакетного вейвлет-преобразования (ВП). Декомпозиция сигнала производилась до пятого уровня, так как это позволило сузить частотные коридоры и описать каждую гармонику тока отдельным вейвлет-коэффициентом. С помощью пакетного ВП авторы определили действующие значения каждой гармонической составляющей и их вклад в суммарную энергию сигнала. Кроме того, пакетное ВП позволило определить гармонический состав кривой тока каждой из фаз в нестационарном несимметричном режиме работы сети на каждом интервале.**

Ключевые слова: высшие гармоники, качество электрической энергии, несимметричный режим, несинусоидальный нестационарный режим, пакетное вейвлет-преобразование, нелинейная нагрузка.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-81-89

I. Введение

В современном мире невозможно представить жизнь человека и общества без энергии – количественной меры взаимодействия различных форм материи и её перехода из одной формы в другую согласно закону сохранения энергии. Из всего многообразия различных видов энергии наиболее удобным видом для передачи и транспортировки на большие расстояния является электрическая энергия.

Электрическую энергию можно рассматривать как особый вид товара, так как за потребленную энергию производятся расчеты с энергоснабжающей организацией. Следовательно, она должна обладать надлежащим качеством.

Согласно действующему на территории РФ ГОСТ 32144-2013 «качество электрической энергии (КЭ) – степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ» [1].

Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) показывают соответствие действительных (полученных в результате замеров) параметров электрической энергии нормированным значениям, указанных в нормативно-технической документации. Под параметрами понимается напряжение, частота, форма кривой питающего напряжения, тока и т.п.

В РФ нормативной документацией, регламентирующей ПКЭ, является ГОСТ 32144-2013, который вступил в силу 01.07.2014.

II. Постановка задачи

Задачи предлагаемой работы:

– подтверждение актуальности проведения научных исследований по направлению «Качество электрической энергии» с помощью проведенного литературного обзора по данной тематике;

– определение действующих значений гармонических составляющих тока и их вклад в результирующий (суммарный) ток системы;

– определение гармонического состава сигнала тока системы в нестационарном несимметричном режиме работы на каждом интервале;

– применение пакетного вейвлет-преобразования для решения поставленных задач.

III. Теория

В настоящее время наиболее приоритетными направлениями по повышению КЭ распределительных сетей 0,4 кВ являются следующие: наличие в распределительных сетях значительной доли нелинейных электроприемников (превышение регламентированного значения коэффициента n-й гармонической составляющей, как для отдельных гармоник, так и суммарного) [2–5], значительная несимметрия напряжений в таких сетях (проявляется при неравномерном распределении группы однофазных потребителей по фазам трехфазной электрической сети, а также при несимметрии элементов распределительных сетей) [6–8], а также возможность появления резонансных режимов вблизи частот каких-либо высших гармоник [9–11].

В работе [2] была произведена модернизация методов, позволяющих свести к минимуму потери электроэнергии при наличии нелинейной нагрузки в системах электроснабжения (СЭС) индивидуального жилищного

строительства. Для снижения уровней высших гармоник (ВГ) и потерь энергии авторы предлагают установить резонансные пассивные (для подавления 3 и 5 гармоник) и активные фильтры (АФГ). По мнению авторов, пассивные фильтры необходимо установить через каждые 100 метров на 3 опорах, начиная с конечной, а активный фильтр – на шинах низкого напряжения питающей трансформаторной подстанции.

На основании данных проведенных исследований авторами [3] проведен анализ изменения коэффициента искажения кривой напряжения K_U. Исследователи связывают максимальные значения коэффициента K_U с подключением к сети огромного числа бытовых нелинейных электроприемников.

В [4] авторами предложены различные подходы, позволяющие производить фильтрацию высших гармонических составляющих.

В [5] предложено использование АФГ для компенсации высших гармоник в сети и разработан алгоритм работы системы управления, позволяющий повысить эффективность использования АФГ.

В [6] произведены физические замеры ПКЭ сети, производящей питание жилого микрорайона, с использованием сертифицированного анализатора КЭ «Chavin Arnoux CA8335». Замеры ПКЭ показали значительное превышение уровней ВГ в сети, а также несимметрию нагрузки. Для исправления ситуации исследовательский коллектив предлагает установить АФГ в СЭС.

В работах [7, 8] приводятся результаты замеров ПКЭ в распределительных сетях 0,4 кВ различных организаций. Авторы произвели всесторонний анализ многочисленных результатов исследований ПКЭ в таких сетях и пришли к выводу, что распределительные электрические сети имеют значительную несимметрию (коэффициенты несимметрии по току и напряжению составляют 30 %, что превышает регламентированные ГОСТ 32144-2013 значения).

В [9] научно исследовательским коллективом была разработана программа, с помощью которой можно вычислить резонансные частоты в СЭС при наличии в распределительной сети конденсаторных батарей и нелинейной нагрузки. Расчет резонансных частот производится на основании построения частотных характеристик импеданса от частоты сети.

Превышение уровней ВГ в сети промышленных предприятий было также выявлено исследовательским коллективом в работах [10, 11]. Кроме того, на основании замеров ПКЭ в СЭС одного из предприятий нефтегазодобывающей отрасли, проведенных с использованием анализатора «Ресурс-UF2M» и построению частотных характеристик импеданса сети, обнаружено возникновение резонансных режимов при определенных сочетаниях нелинейных нагрузок и наличия конденсаторных батарей.

В настоящее время подавляющее большинство измерительных приборов производят цифровую обработку исходных сигналов для их последующей записи, либо сохранения результатов. Для обработки сигналов можно использовать различные методы, однако наибольшее распространение в настоящий момент получило преобразование Фурье и вейвлет-преобразование.

Преобразование Фурье (ПФ) широко применяется для обработки стационарных во времени сигналов с приемлемой точностью. Однако, при разложении нестационарных сигналов наблюдается совсем иная картина: в амплитудно-частотном спектре в этом случае мы видим множество ложных частот, возникает эффект «растекания спектра» (рис. 1) [12].

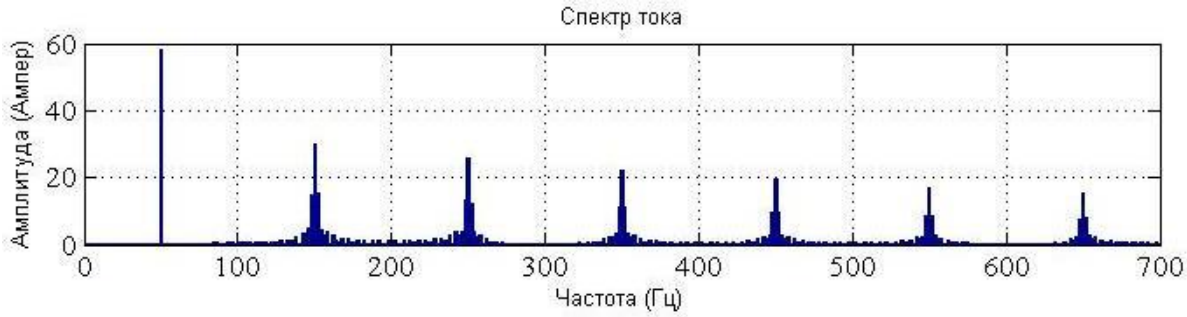


Рис. 1. Фурье-спектр нестационарного сигнала тока

Эффект растекания спектра может быть преодолен различными способами: используя дополнительную оконную функцию (оконное преобразование Фурье), либо применяя другой метод цифровой обработки сигналов – вейвлет-преобразование, которое получило наибольшее распространение для решения различных задач в электроэнергетике [12–18].

Например, в работе [13] показано преимущество использования вейвлет-преобразования перед преобразованием Фурье для анализа нестационарных во времени сигналов; применение ВП позволяет производить постоянный мониторинг режимных параметров системы [14]; расчет частотных характеристик импеданса сети и выявлять частоты, вблизи которых возможно возникновение резонансных режимов [15, 16]; определять действующие значения величин и производить расчет составляющих мощности, а также дополнительных потерь при несинусоидальных нестационарных режимах [12, 17, 18].

Вейвлет-преобразование сигналов, характеризующих параметры режима электроэнергетической системы (ток, напряжение, мощность), реализуется с помощью скалярного произведения исходного сигнала и вейвлет-функции ψ(t). Например, вейвлет-преобразование сигнала тока может быть записано с использованием выражения (1):

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} i(t)\psi\left(2^j t - k\right)dt, \tag{1}$$

где j – параметр масштаба, k – параметр временного сдвига, $1/\sqrt{2^j}$ – параметр нормировки.

В настоящей работе производится анализ несинусоидального нестационарного режима с несимметрией тока по фазам СЭС с использованием математического инструмента – пакетного вейвлет-преобразования для частотного разложения сигнала тока.

Алгоритм расчета несинусоидального несимметричного режима (для основной гармоники сети) может быть представлен следующим образом.

Пусть ЭДС фаз А, В и С представлены как:

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= Ue^{j0^0} \\ \dot{E}_B &= Ue^{j240^0} \\ \dot{E}_C &= Ue^{j120^0} \end{aligned} \tag{2}$$

Тогда проводимости фаз рассчитываются по формулам (3-5).

$$\dot{Y}_A = \frac{1}{(R_{КЗ} + R_A) + j(X_{КЗ} + X_A)}, \tag{3}$$

$$\dot{Y}_B = \frac{1}{(R_{КЗ} + R_B) + j(X_{КЗ} + X_B)}, \tag{4}$$

$$\dot{Y}_C = \frac{1}{(R_{КЗ} + R_C) + j(X_{КЗ} + X_C)}, \tag{5}$$

где $R_{КЗ}$, $X_{КЗ}$ – активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора СЭС; R_A, X_A, R_B, X_B, R_C, X_C – соответственно активные и индуктивные сопротивления нагрузок разных фаз сети.

Активное сопротивление короткого замыкания трансформатора определяем по выражению (6).

$$R_{КЗ} = \frac{P_{КЗ}}{3 \cdot I_{2НОМ}} \tag{6}$$

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора определим по паспортным данным трансформатора: напряжению короткого замыкания, приведенного к низшему напряжению ($U_{2КЗ}$) и номинальному току вторичной обмотки ($I_{2НОМ}$).

$$Z_{КЗ} = \frac{U_{2КЗ}}{I_{2НОМ}} \tag{7}$$

где $I_{2НОМ} = \frac{S_Н}{\sqrt{3}U_2}$, $U_{2КЗ} = \frac{U_2 \cdot U_{КЗ\%}}{\sqrt{3} \cdot 100}$,

$S_Н$ – номинальная мощность трансформатора,

U_2 – напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора,

$U_{КЗ\%}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора.

Зная полное и активное сопротивление трансформатора, определим его индуктивное сопротивление по формуле (8).

$$X_{КЗ} = \sqrt{Z_{КЗ}^{\ 2} - R_{КЗ}^{\ 2}} \tag{8}$$

Проводимость нейтрали рассчитывается по выражению (9).

$$\dot{Y}_N = \frac{1}{R_N + jX_N}, \tag{9}$$

где R_N, X_N – активное и индуктивное сопротивление нейтрали распределительной сети.

Напряжение смещения нейтрали определим по формуле (10).

$$U_{O'O} = \frac{\dot{E}_A\dot{Y}_A + \dot{E}_B\dot{Y}_B + \dot{E}_C\dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}. \tag{10}$$

Токи, протекающие по фазам сети, вычисляем по выражениям (11-13).

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_A. \tag{11}$$

$$\dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_B. \tag{12}$$

$$\dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_{O'O}) \cdot \dot{Y}_C. \tag{13}$$

При наличии ВГ параметры рассчитываются по аналогии с вышеприведенным алгоритмом с учетом, что индуктивное сопротивление $X_L = n\omega L$, а емкостное – $X_C = \frac{1}{n\omega C}$, где n – номер гармоники.

IV. Результаты экспериментов

Произведем расчет и моделирование нестационарного несимметричного режима работы СЭС, содержащую в своем составе нелинейную нагрузку. Схема фрагмента исследуемой СЭС, приведена на рис. 2, а её упрощенная схема замещения – на рис. 3. К секции шин 0,4 кВ подключена однофазная нагрузка (на схеме обозначена Н), причем потребители (в том числе нелинейные) распределены неравномерно по фазам сети. Иными словами, мы имеем дело с несинусоидальным несимметричным режимом.

Параметры нагрузки и паспортные данные трансформатора ТМГ-160/6/0.4 приведены в таблице 1.

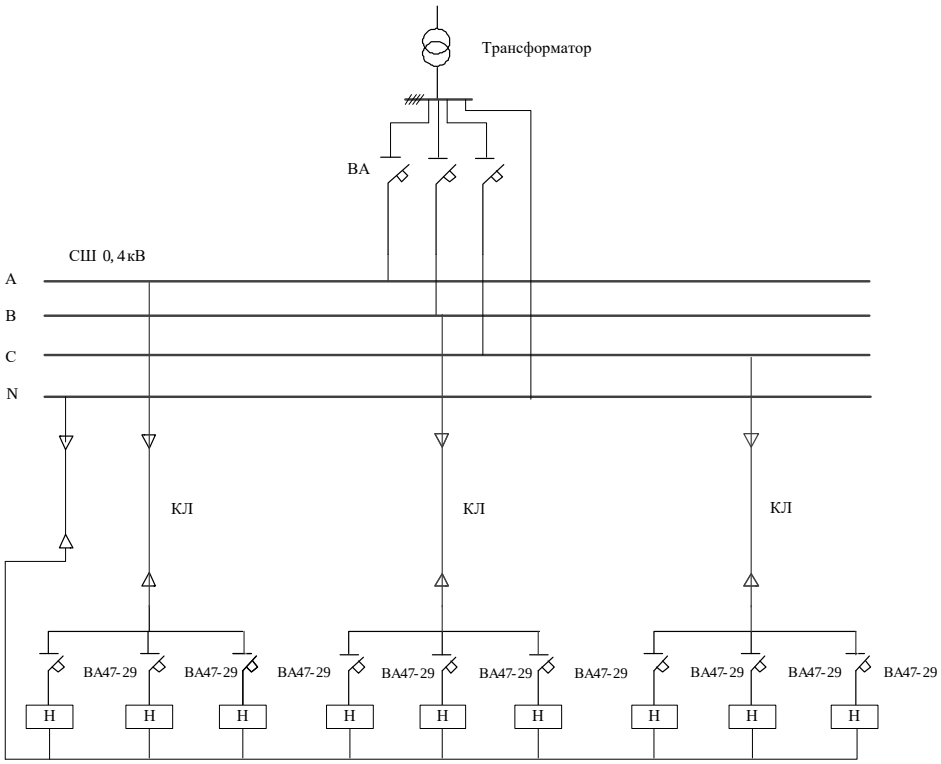


Рис. 2. Схема исследуемой СЭС

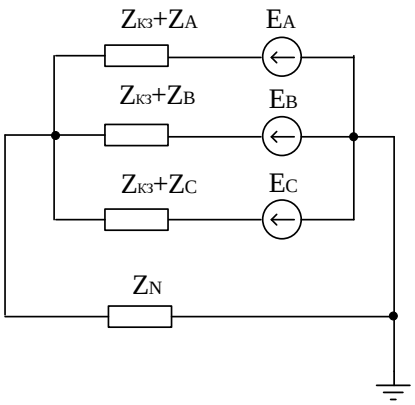


Рис. 3. Упрощенная схема замещения исследуемой СЭС

ТАБЛИЦА 1
ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА И ПАРАМЕТРЫ НАГРУЗКИ

Параметры трансформатора ТМГ-160/6/0.4						
$P_{хх}$, Вт	$P_{кз}$, Вт	$U_{кз}$, %	$I_{хх}$, %	$S_н$, кВ·А	U_1, кВ	U_2, кВ
410	2600	4.5	0.5	160	6	0.4

Нагрузка			
Z_A, Ом	Z_B, Ом	Z_C, Ом	Z_N, Ом
$2.15e^{j7}$	$2.55e^{j15}$	$2.3e^{j11}$	$0.12e^{j20}$

Расчет несимметричного режима производится с использованием выражений (2–13). Полученные значения параметров схемы замещения (для основной гармоники сети) приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
ПАРАМЕТРЫ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА

$\dot{E}_A$, В	$\dot{E}_B$, В	$\dot{E}_C$, В	$\dot{U}_{O'O}$, В
219.393	-109.697-190j	-109.697+190j	0.405+1.935j
$\dot{Y}_A$	$\dot{Y}_B$	$\dot{Y}_C$	$\dot{Y}_N$
0.457-0.064j	0.374-0.105j	0.422-0.088j	j2.85-7.831
$\dot{I}_A$	$\dot{I}_B$	$\dot{I}_C$	
99.849-14.837j	-61.384-60.174j	-29.778+89.008j	

Исследуемая нами распределительная сеть имеет 4 характерных интервала (это видно из графиков-осциллограмм, приведенных на рис. 4). Кроме того, анализ приведенных осциллограмм свидетельствует о том, что система имеет несимметрию по фазам.

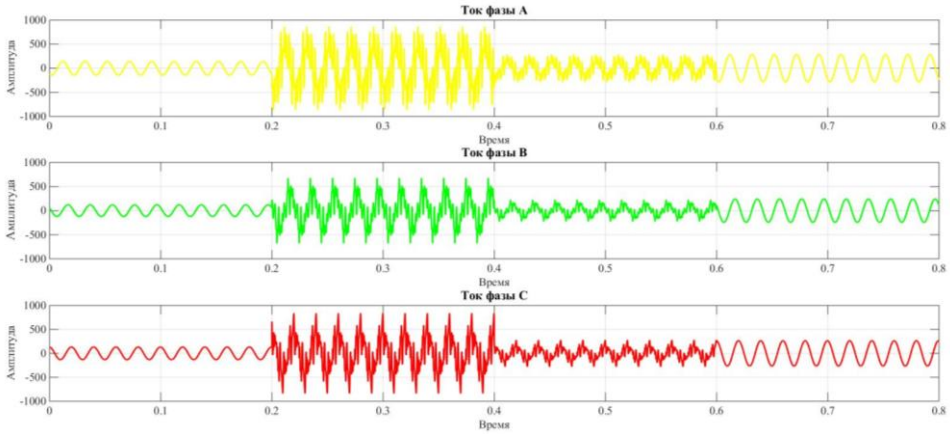


Рис. 4. Токи разных фаз исследуемой распределительной сети

Произведем декомпозицию сигналов тока разных фаз распределительной сети, используя пакетное ВП (рис. 5). Разложение сигнала необходимо для определения гармонического состава, действующих значений токов отдельных гармоник, их вклад в суммарную энергию спектра (разложение сигнала производится до 5 уровня разложения, так как в этом случае каждая из гармоник сигнала описывается своим вейвлет-коэффициентом). Результаты расчета приведены в табл. 3.

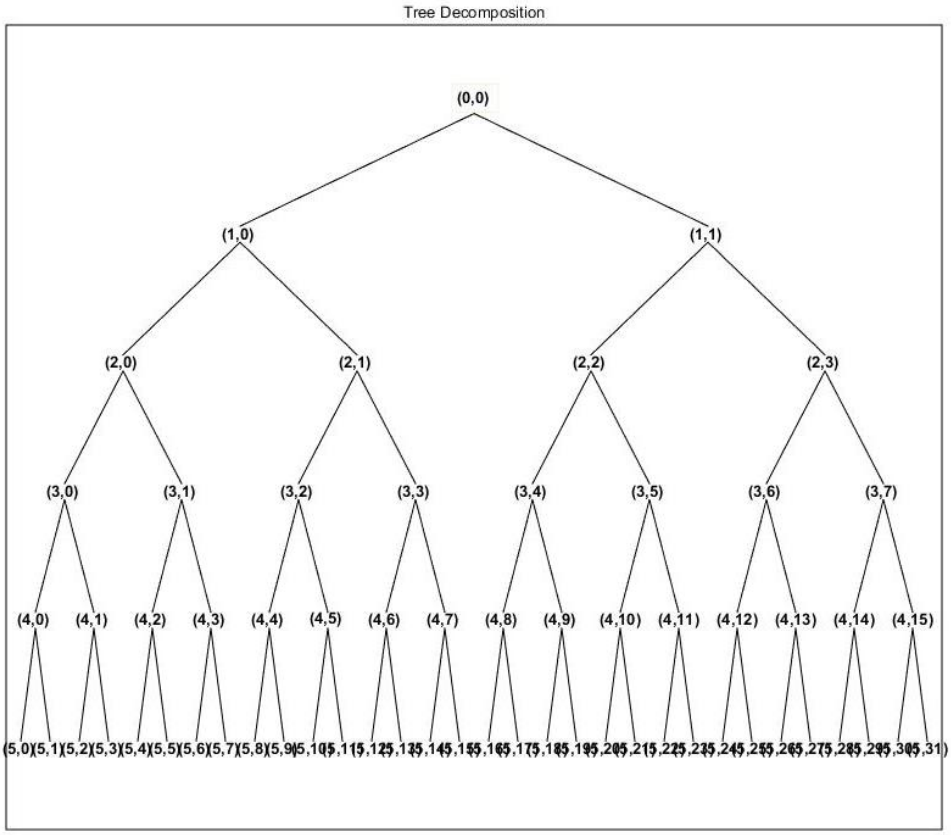


Рис. 5. Дерево разложения исходного сигнала до 5 уровня

ТАБЛИЦА 3

ВКЛАДЫ ТОКОВ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ ОТДЕЛЬНЫХ ГАРМОНИК В СУММАРНУЮ ЭНЕРГИЮ СИГНАЛА, ВЫЧИСЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Фаза А	
Вейвлет-коэффициент	**Е, %**
5,0	61,6756
5,1	0,281
5,2	7,4839
5,3	13,7815
5,4	0,6622
5,5	3,2488
5,6	2,2724
5,7	3,896
5,8	0,3027
5,9	0,0026
5,10	0,7377
5,11	0,6445
5,12	0,9329
5,13	2,3306
5,14	0,2207
5,15	1,1643
5,16	0,0004
5,17	0,0004

5,18	0,0003
5,19	0,0005
5,20	0,0007
5,21	0,0005
5,22	0,0006
5,23	0,0006
5,24	0,2037
5,25	0,0008
5,26	0,0758
5,27	0,0557
5,28	0,0003
5,29	0,0005
5,30	0,0213
5,31	0,0007
Фаза B	
5,0	77,2397
5,1	0,1943
5,2	4,5975
5,3	9,9145
5,4	0,3709
5,5	1,5444
5,6	1,3839
5,7	1,9297
5,8	0,0882
5,9	0,0004
5,10	0,2966
5,11	0,2082
5,12	0,2968
5,13	1,1185
5,14	0,0987
5,15	0,4563
5,16	0,0002
5,17	0,0002
5,18	0,0002
5,19	0,0002
5,20	0,0004
5,21	0,0003
5,22	0,0003
5,23	0,0003
5,24	0,1228
5,25	0,0004
5,26	0,0392
5,27	0,0842
5,28	0,0002
5,29	0,0003
5,30	0,012
5,31	0,0004
Фаза C	
5,0	70,1969
5,1	0,1899
5,2	5,4236
5,3	12,8482
5,4	0,7014
5,5	2,8365
5,6	1,6466
5,7	2,6366
5,8	0,2745
5,9	0,0067
5,10	0,4774

5,11	0,3677
5,12	0,2811
5,13	0,9621
5,14	0,139
5,15	0,818
5,16	0,0016
5,17	0,0015
5,18	0,0011
5,19	0,0015
5,20	0,0023
5,21	0,0013
5,22	0,0023
5,23	0,0019
5,24	0,0378
5,25	0,0048
5,26	0,0571
5,27	0,0532
5,28	0,0015
5,29	0,0016
5,30	0,0218
5,31	0,0024

V. Выводы и заключение

1. Проведенный анализ литературных источников доказывает актуальность, востребованность и необходимость дальнейшего проведения научных исследований по направлению «Качество электрической энергии».

2. Определены гармонические составляющие суммарного тока СЭС на каждом интервале. Кроме того, выполнен расчет токов однофазных электроприемников при несимметричной загрузке фаз трехфазной СЭС. Показано, что токи разных фаз неодинаковы по величине.

3. Определение гармонического состава сигнала тока для каждой из фаз сети и вклад каждой гармоники в суммарную энергию сигнала выполнено с помощью пакетного ВП с глубиной разложения до пятого уровня.

4. Показано, что пакетное ВП справилось со своими задачами – определением гармонического состава тока и расчетом действующих значений токов высших гармонических составляющих.

Список литературы

1.ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

2.Авербух М. А., Жилин Е. В., Прокопишин Д. И. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Проблемы региональной энергетики. 2018. № 2 (37). С. 31–38.

3.Кобелев А. В., Зыбин А. А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17, № 1. С. 187–191.

4.Степанов В. М., Базыль И. М. Влияние высших гармоник в системах электроснабжения предприятия на потери электрической энергии // Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки. 2013. № 12–2. С. 27–31.

5.Горюнов В. Н., Осипов Д. С., Лютаревич А. Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 6. С. 20–24.

6.Авербух М. А., Жилин Е. В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 40–45.

7.Дед А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2017. № 2 (152). С. 63–65.

8.Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии 2018. № 2 (158). С. 60–63.

9.Михеев Г. М., Атаманов М. Н., Дрей Н. М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.

10. Алферов И.В., Зырянов В.М., Митрофанов Н.А. Влияние конденсаторных установок на перетоки мощности высших гармоник в автономной энергосистеме // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 8 (139). С. 95–103.

11. Зырянов В. М., Кирьянова Н. Г., Митрофанов Н. А. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 2 (71). С. 131–142.

12. Долгих Н. Н., Катеров Ф. В., Осипов Д. С., Птицына Е. В., Файфер Л. А. Определение коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока по вейвлет-коэффициентам // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 113. С. 814–825.

13. Santoso S., Grady W. M., Powers E.J., Lamoree J. and Bhatt S.C. “Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. Vol. 15, no. 1. Pp. 247-254. DOI: 10.1109/61.847259.

14. Ren J., Kezunovic M. “Real-time power system frequency and phasors estimation using recursive wavelet transfotm” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26, no. 3. Pp. 1392-1402. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2135385.

15. Gomez-Luna E., Silva D., Aponte G., Pleite J. G., Hinestroza D. “Obtaining the Electrical Impedance Using Wavelet Transform From the Time Responce” // IEEE Transactions on Power Delivery. 2013. Vol. 28, Issue 2. Pp. 1242-1244. DOI: 110.1109/TPWRD.2012.2234942.

16. Osipov D. S., Kovalenko D. V., Dolgikh N. N. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // 2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). P. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.

17. Osipov D. S., Dolgikh N. N., Goryunov V. N., Kovalenko D.V. Algorithms of packet wavelet transform for power determination under nonsinusoidal modes” // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819059.

18. Осипов Д. С., Долгих Н. Н., Горовой С. А., Поплавская В. Е. Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2018. № 6 (162). С. 76–81.

УДК 621.6.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ С ПРИМЕСЯМИ

А. Г. Михайлов, В. С. Виниченко, И. П. Пышный, А. Е. Иванова, Е. Н. Слободина
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Важнейшая задача теплоэнергетики – увеличение эффективности работы тепловых установок. Одним из способов повышения эффективности является улучшение теплофизических свойств теплоносителей. В данной работе исследовано изменение плотности наножидкостей, приготовленных на основе трансформаторного масла Т-1500У (дисперсная среда) и различных твердых частиц (дисперсная фаза). Показано влияние природы выбранных частиц (неодим, керамика, латунь), их концентрации и размера. Установлено, что введение выбранных примесей приводит к существенному повышению плотности получаемой наножидкости по сравнению с чистым маслом. Показано, что плотность наножидкости с уменьшением размера частиц увеличивается.**

Ключевые слова: наножидкость, плотность, наночастицы, суспензия.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-89-93

I. Введение

Развитие промышленности ставит новые задачи перед инженерами и исследователями. Главными вопросами по-прежнему остаются качество продукции, рентабельность производства, актуальность выпускаемой продукции и т.д. Современное производство неразрывно связано с современными научными достижениями и грамотный инженер всегда должен держать «руку на пульсе» в сфере новинок. В частности, активно идёт изу-

чение «особых» материалов–наножидкостей. Наножидкость – это дисперсная система, состоящая из основной жидкости и твердых наночастиц, имеющих размер от 1 до 100 нм. Особое внимание уделяется теплофизическим свойствам, таким как теплоемкость и коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, а также изменению вязкости и плотности. Например, увеличение теплопроводности наножидкости делает ее очень перспективным рабочим телом во многих теплоэнергетических устройствах: для охлаждения различных установок, при создании современных систем передачи и выработки тепловой энергии и т.д. Однако, несмотря на значительное количество работ в этой области, многие проблемы остаются малоизученными, что требует дальнейшего исследования свойств наножидкостей.

II. Постановка задачи

Задачей исследования являлось получение теплоносителя с различными видами примесных частиц и экспериментальное определение свойств полученных коллоидно-дисперсных жидкостей. Необходимо было установить, как размеры частиц, их природа и концентрация влияют на такой параметр жидкости, как плотность **(ρ)**.

III. Теория

Вода, как теплоноситель, получила довольно широкое распространение в теплоэнергетике. Ее главными достоинствами являются ее термодинамические свойства. Однако при нормальном давлении воду можно нагреть максимум до 100 °С. После вышеуказанной температуры вода переходит из жидкого агрегатного состояния – в парообразное, а теплофизические свойства пара значительно отличаются от свойств жидкости, причем в худшую сторону. Чтобы нагреть воду до более высокой температуры необходимо увеличивать давление в системе.

Если рассматривать в качестве теплоносителя масло, то здесь мы выигрываем в температуре, то есть его температура кипения значительно выше, чем у воды, но проигрываем в коэффициенте теплоотдачи.

Так как наука не стоит на месте, учеными была выдвинута теория о том, что при добавлении в жидкость дисперсных частиц свойства полученной суспензии будут существенно меняться.

Рассмотрим формулу для определения плотности теплового потока [4]

$$q = \rho c V \Delta T,$$

где q – тепловой поток [Вт/м^2]

ρ – плотность носителя [кг/м^3]

c – массовая теплоёмкость [Дж/(кг·К)]

v – скорость течения жидкости [м/с^2]

ΔT – температурный напор [К]

Распишем размерности выше представленных величин

$$\rho c V \Delta T = \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}\frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}\frac{\text{м}}{\text{с}}\text{К} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}\text{К}$$

Коэффициент теплоотдачи α имеет размерность $\text{Вт}/_{\text{м}^2\text{К}}$, следовательно из этого можно сделать вывод, что коэффициент теплоотдачи зависит от плотности жидкости.

Если говорить о суспензиях, то их плотность будет увеличиваться с ростом концентрации растворенных в жидкости частиц. Причем, на это изменение плотности также будет оказывать влияние размер и род этих частиц.

IV. Результаты экспериментов и обсуждение результатов

Для проведения исследований были использованы следующие материалы: неодим марки N 45V с размерами частиц 0,4–0,8 мкм, латунь марки Л63 с размерами частиц 2–3 мкм и оксид кремния с размерами частиц 0,75–1 мкм. В качестве основы-жидкости было использовано трансформаторное масло Т-1500У. Получение суспензии осуществлялось при помощи смешения масла с частицами. Массовые концентрации частиц составляли 0,5%, 1% и 1,5%. Перемешивание жидкости и взвеси примесей проводилось с использованием оборудования ресурсного центра «Политест» на базе Омского Государственного Технического Университета. Для получения суспензий использовалась ультразвуковая ванна УЗВ-3 (рис. 1) с ультразвуковым диспергатором УЗП-100 (рис. 2).

Рис. 1. Ультразвуковая ванна УВЗ-3

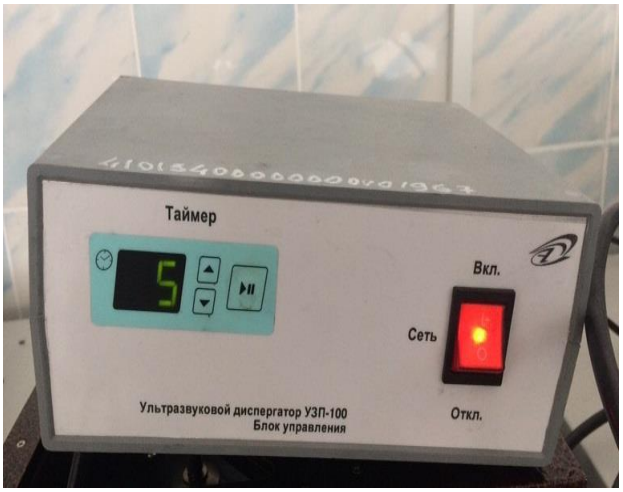


Рис. 2. Блок управления ультразвуковым диспергатором УЗП-100

В итоге было получено 9 образцов с разной процентной концентрацией примесей. Далее для предварительного расчёта коэффициента теплоотдачи для каждого из материалов были проведены замеры плотностей при помощи набора ареометров АОН-1 (700-1840 кг/м^3) по ГОСТ 18481-81.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3–5.

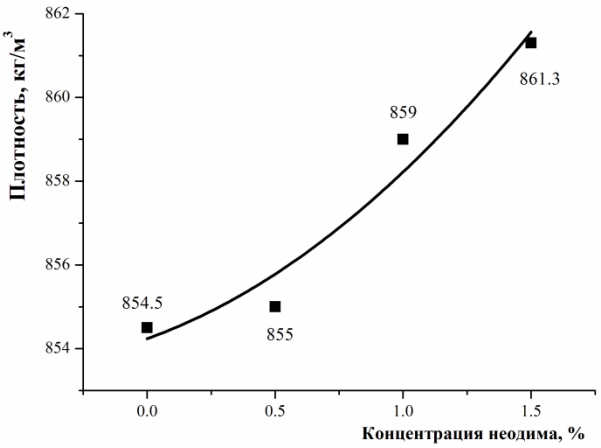


Рис. 3. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц неодима N 45V

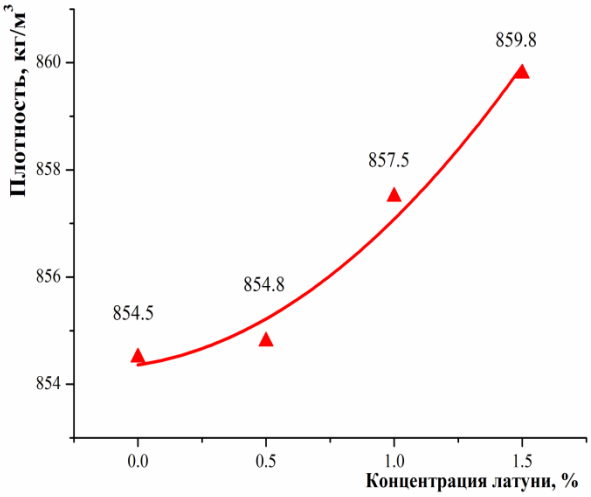


Рис. 4. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц латуни марки Л63

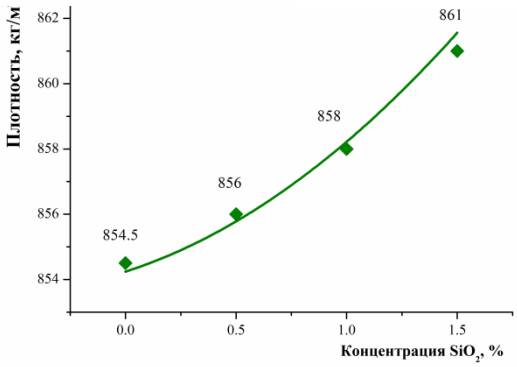


Рис. 5. Зависимость плотности суспензии от концентрации частиц керамического порошка

Из графиков на рисунках видно, что при малой концентрации максимальную плотность имеет жидкость, смешанная с керамикой, но с увеличением концентрации наибольшую плотность имеет жидкость, смешанная с неодимом. Это связано с тем, что при малой концентрации большая часть частиц керамики смешивается с жидкостью, что увеличивает плотность суспензии по отношению к другим материалам. В большей концентрации лучше растворяются частицы с наименьшим размером, что приводит к увеличению плотности по сравнению с другими смесями.

В целом, плотность с увеличением концентрации примесей растёт. В работе [3] было показано, что теплоёмкость наножидкостей также увеличивается с ростом концентрации наночастиц. Об этом говорит график, полученный для смеси этиленгликоля с частицами оксида алюминия (рис. 6).

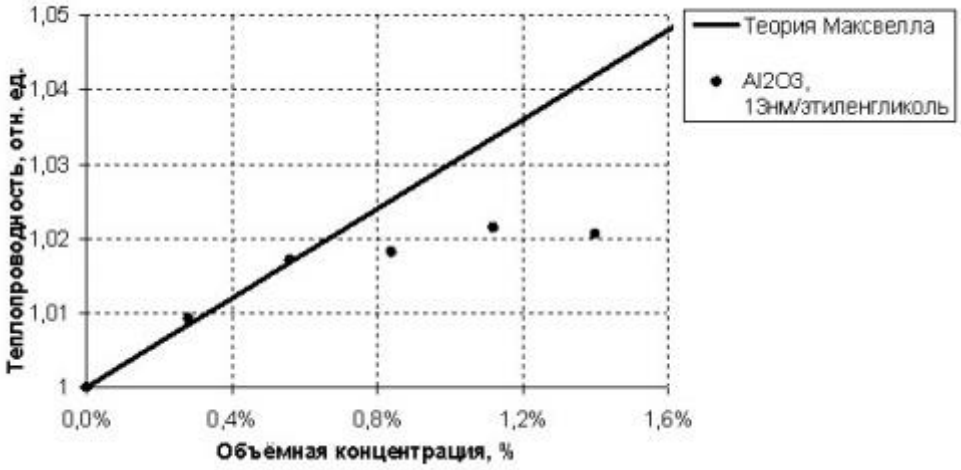


Рис. 6. Зависимость теплопроводности этиленгликоля от концентрации частиц оксида алюминия

Увеличение теплопроводности и плотности жидкости приведёт к росту коэффициента теплоотдачи.

В результате анализа полученных данных, была установлена также зависимость плотности жидкости от размеров частиц. На графике 7 приведены значения для плотности смесей при одинаковой массовой концентрации частиц (1,5%).

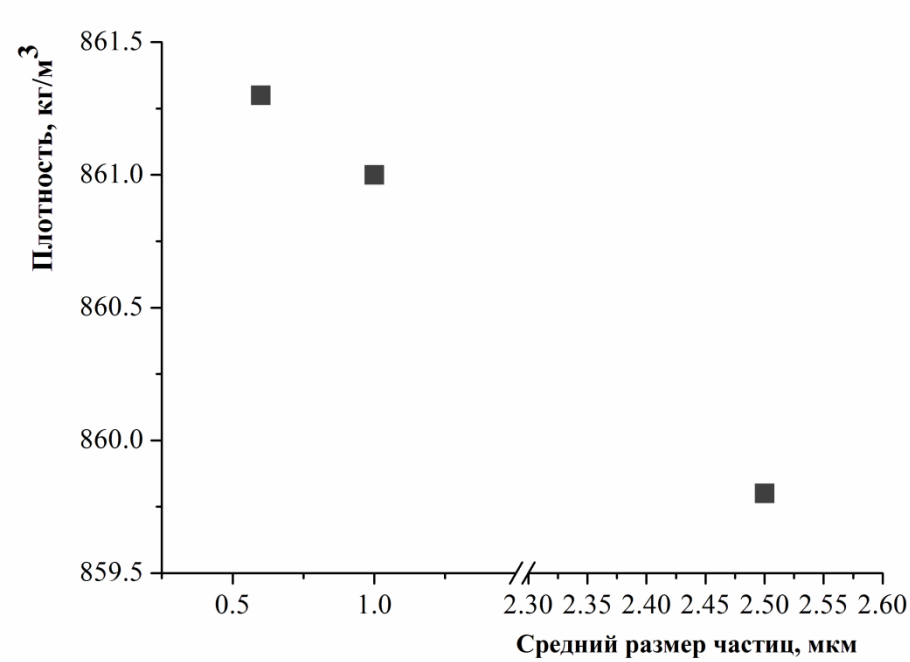


Рис. 7. Зависимость плотности жидкости от размера частиц
при одинаковой массовой концентрации (1,5 %)

Из графика видно, что наименьший размер частиц соответствует наибольшей плотности. Это объясняется тем, что мелкие частицы более равномерно распределены по всему объёму и меньше подвержены агломерации.

VI. Выводы и заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что внесение наночастиц изменяет теплофизические свойства носителя. Плотность суспензии тем выше, чем больше концентрация частиц, добавленных к основной жидкости. Коэффициент теплоотдачи для таких жидкостей будет существенно выше, чем у чистых. Также было установлено, что размеры частиц влияют на плотность суспензии.

Список литературы

1. Михайлов А. Г, Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с неводяным теплоносителем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 37–40.

2. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 73–78.

3. Бардаханов С. П., Новопашин С. А., Серебрякова М. А. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия // Наносистемы: физика, химия, математика.2012. № 3 (1). С. 27–33.

4. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомёл А. С. Теплопередача: учебник. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

5. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. В. физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика.2016. Т. 19, № I. С. 75–83.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОДСИНХРОННОГО РЕЗОНАНСА

Д. В. Рысев, П. В. Рысев

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Рассматривается влияние уровня продольной компенсации линии электропередачи на возникновение и развитие явления электромеханического резонанса в турбогенераторе при самоустраняющемся коротком замыкании в нагрузке. Показано моделирование энергосистемы. Показана зависимость амплитуды крутильных колебаний в многомассовой модели турбоагрегата при изменении уровня продольной компенсации. Явление подсинхронного резонанса возможно в изолированных энергосистемах с нелинейной нагрузкой и продольной компенсацией. Цель исследования – выявить зависимость амплитуды колебаний в механической части турбогенератора от уровня продольной компенсации.**

Ключевые слова: подсинхронный резонанс, турбогенератор, крутильные колебания.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-93-98

I. Введение

Развитие технологии передачи электрической энергии привело к созданию устройств продольной компенсации – систем, позволяющих компенсировать потребляемую реактивную мощность за счет ее выработки. Подобная компенсация повышает коэффициент мощности и увеличивает пропускную способность линий электропередачи. Однако, при определенном сочетании типа и мощности электростанции, вида и мощности нагрузки, уровня компенсации и наличия возмущений в системе возможно возникновение нежелательных режимов, приводящих к скручиванию элементов многомассовой системы электростанции. Такая ситуация подробно описывалась как в зарубежных [1] – [4], так и в отечественных источниках [5], [6].

Целью данной статьи является моделирование подсинхронного резонанса в турбогенераторе при изменении уровня продольной компенсации.

II. Постановка задачи

Таким образом, задача исследования сводится к моделированию энергосистемы, содержащей турбогенератор, линию электропередачи, нагрузку и устройства продольной емкостной компенсации при внешнем воз-

мущении в виде короткого замыкания и изменении уровня компенсации. В качестве программы для моделирования подходит пакет MATLAB. Модель энергосистемы – модифицированная IEEE Second Benchmark [7].

III. Теория

Структурная модель энергосистемы изображена на рис. 1. Предметом исследования выступают скручивающие моменты между элементами турбины, которые проявляются при появлении внешнего возмущения.

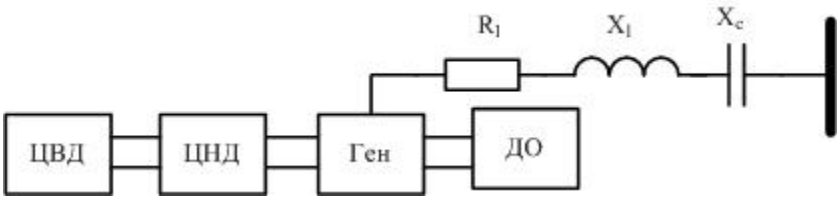


Рис. 1. Схема энергосистемы

Уравнения, описывающие многомассовую модель турбогенератора, представлены в [8] и скорректированы под текущую модель (1) – (13)

$$-(X_l+X_d)\frac{di_d}{dt}+X_{md}\frac{di_f}{dt}+X_{md}\frac{di_D}{dt}= \\ =\omega_b\left[(R_l+R_a)i_d-(X_l+\omega_r X_q)i_q+\omega_r X_{rnq}i_Q+e_{cd}+\upsilon_0\sin\delta_r\right] \tag{1}$$

$$-(X_l+X_q)\frac{di_q}{dt}+X_{mq}\frac{di_Q}{dt}= \\ =\omega_b\left[(X_l+\omega_r X_d)i_d+(R_l+R_a)i_q-\omega_r X_{rnq}i_f+\omega_r X_{md}i_D+e_{cq}+\upsilon_0\cos\delta_r\right] \tag{2}$$

$$-X_{md}\frac{di_d}{dt}+X_f\frac{di_f}{dt}+X_{md}\frac{di_D}{dt}=\omega_b\left[-R_f i_f+\frac{R_f E_{fd}}{X_{md}}\right] \tag{3}$$

$$-X_{mq}\frac{di_q}{dt}+X_Q\frac{di_Q}{dt}=-\omega_b R_Q i_Q \tag{4}$$

$$-X_{md}\frac{di_d}{dt}+X_{md}\frac{di_f}{dt}+X_D\frac{di_D}{dt}=-\omega_b R_D i_D, \tag{5}$$

где $\upsilon_f = R_f E_{ed}/X_{md}$.

Падение напряжения на X_c:

$$\frac{de_{cd}}{dt}=\omega_b(X_c i_d+e_{cq}) \tag{6}$$

$$\frac{de_{cq}}{dt}=\omega_b(X_c i_q-e_{cd}) \tag{7}$$

Цилиндр высокого давления

$$\frac{d\omega_1}{dt}=\frac{1}{M_1}\left[-D_1(\omega_1-1)-K_{12}(\theta_1-\theta_2)\right] \tag{8}$$

$$\frac{d\theta_1}{dt}=\omega_b(\omega_1-1) \tag{9}$$

Цилиндр низкого давления

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{M_2}\left[-D_2(\omega_2 - 1) + K_{12}(\theta_1 - \theta_2) - K_{23}(\theta_2 - \delta_r)\right] \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \omega_b(\omega_2 - 1) \quad (11)$$

Генератор

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{M_3}\left[T_m - T_e + K_{23}(\theta_2 - \delta_r) - D_r(\omega_r - 1)\right] \quad (12)$$

$$\frac{d\delta_r}{dt} = \omega_b(\omega_r - 1) \quad (13)$$

где $T_e = i_q\psi_d - i_d\psi_q = (X_q - X_d)i_d i_q + X_{md} i_f i_q - X_{mq} i_Q i_d + X_{md} i_D i_q$

Уравнения (1) – (13) образуют систему 13 нелинейных ОДУ первого порядка, описывающих работу энергосистемы, со следующими переменными: i_d, i_q, i_f, i_Q, i_D, e_{cd}, e_{cq}, ω_1, θ_1, ω_2, θ_2, ω_r, δ_r.

Электрические параметры генератора и линии (в о.е.): X_{md}=1.57, X_d=1.65, X_q=1.59, X_f=1.61, X_{mq}=1.53, X_D=1.41, X_Q=1.39, R_f=0.012, R_D=0.0029, R_a=0.0045, X_l=0.21, R_l=0.0173, R_Q=0.0024.

Механические параметры системы (в о.е.): D_1=0.3104, D_2=0.05, M_1=1.55, M_2=0.249, M_3=0.031, K_{12}=83.47, K_{23}=42.702.

Управляющие параметры: T_m, E_{fd}, υ_0, $\mu = X_c/X_l$.

IV. Результаты экспериментов

На рис. 2 изображена модель энергосистемы, построенная в программе MATLAB. Эксперимент заключался в моделировании энергосистемы при различных уровнях компенсации реактивной мощности и анализе полученных результатов. В ходе исследования были получены осциллограммы токов короткого замыкания (рис. 3), отклонений угловых скоростей (рис. 4), моментов скручивания (рис. 5, 6, 7), и построена зависимость амплитуд скручивающих моментов от уровня продольной компенсации (рис. 8).

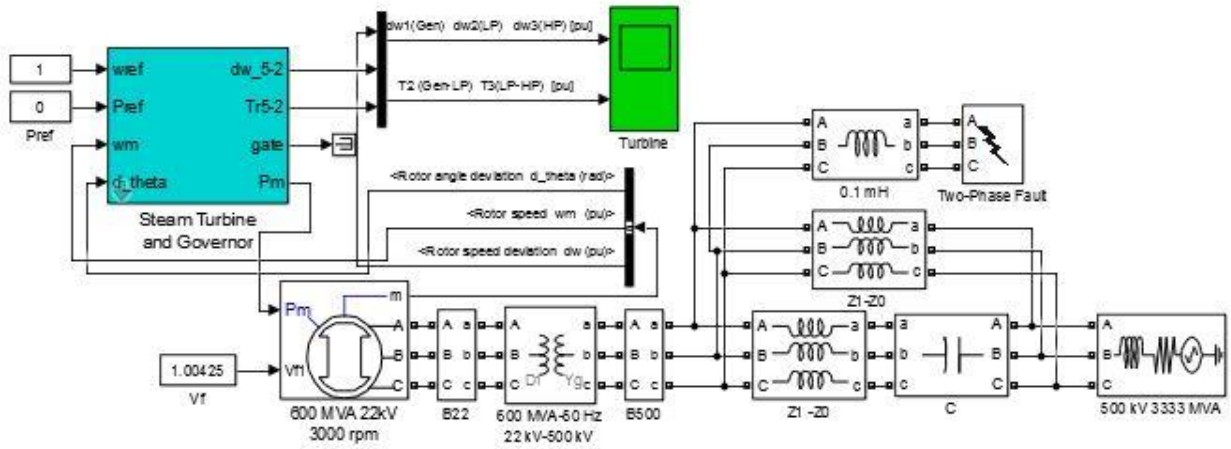


Рис. 2. Модель исследуемой энергосистемы в MATLAB Simulink

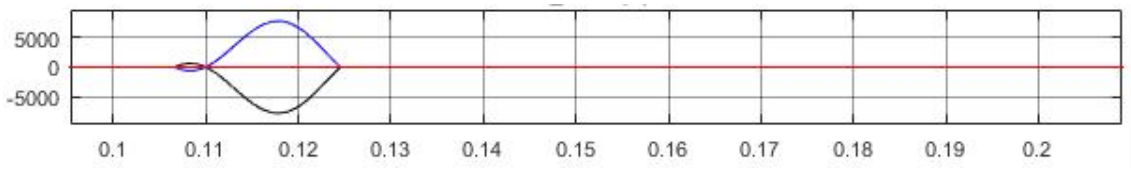


Рис. 3. Токи короткого замыкания

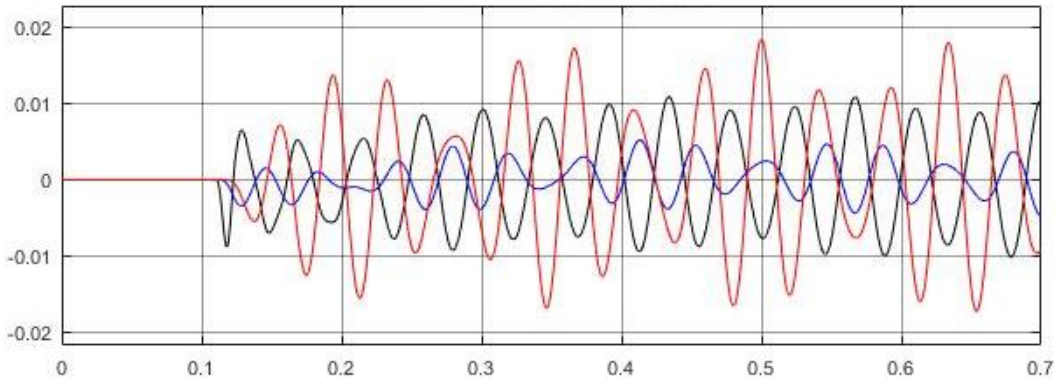


Рис. 4. Отклонения угловых скоростей при μ= 47%

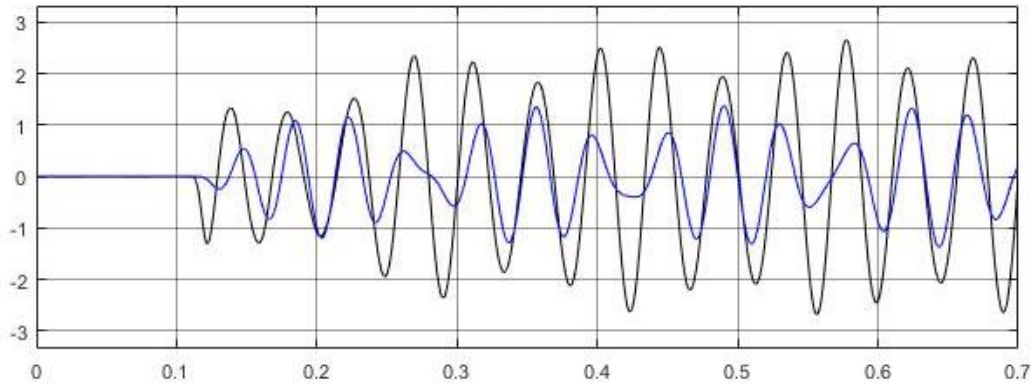


Рис. 5. Скручивающие моменты при μ= 47%

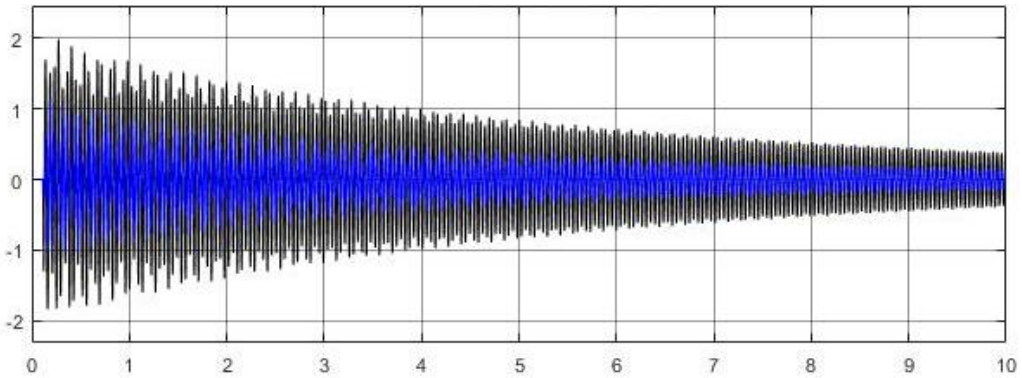


Рис. 6. Скручивающие моменты при μ= 40%

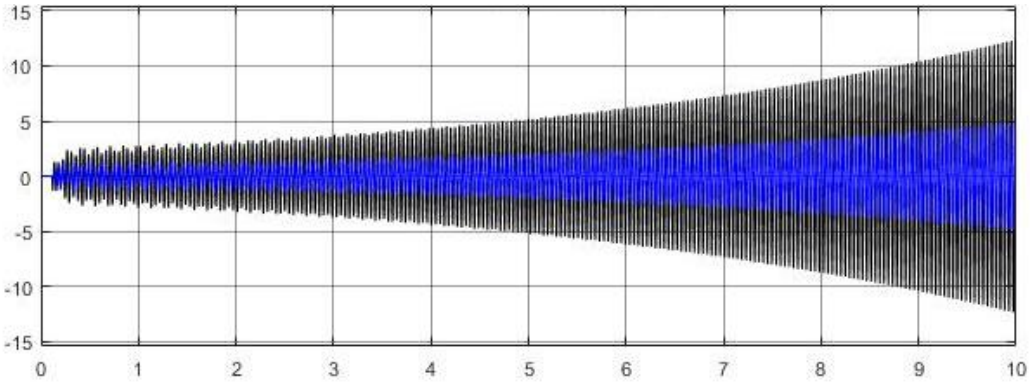


Рис. 7. Скручивающие моменты при μ= 47%

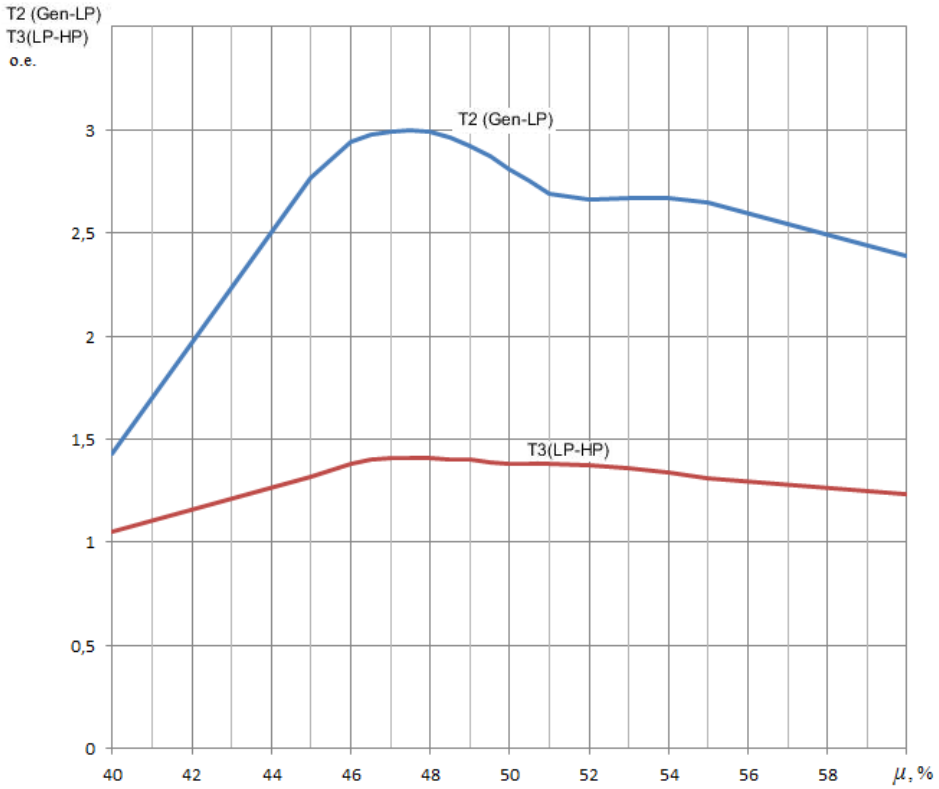


Рис. 8. Зависимость амплитуд скручивающих моментов от уровня продольной компенсации

V. Обсуждение результатов

Из приведенных графиков видно, что внешние возмущения в энергосистеме приводят к появлению сложных непериодических колебаний в турбине, которые слабо затухают при одном значении емкости продольной компенсации и возрастают при другом. На рис. 8 показана зависимость, свидетельствующая о том, что связь уровня продольной компенсации с амплитудами скручивающих моментов нелинейна и имеет свой максимум. При значениях уровня продольной компенсации от 44 до 55 % колебания в механической части турбогенератора не затухают, что является примером неустойчивого движения.

VI. Выводы и заключение

Модель энергосистемы позволяет оценить влияние компенсации на устойчивость работы энергосистемы при наличии внешнего возмущения. Стоит отметить узкий диапазон уровня продольной компенсации, при котором колебания в механической части турбогенератора возрастают во времени. Полученные в ходе моделирования графики повышают объем знаний о подсинхронном резонансе в энергосистеме, содержащей турбогенератор и устройства продольной компенсации.

Список литературы

1. Walker D. N., Bowler C. E., Jackson R. L., Hodges D. A. Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave // IEEE Trans. on PAS, Sep./Oct. 1975. P. 1878–1889.

2. Larsen E. V., Baker D. H. Series Compensation Operating Limits- a New Concept For Subsynchronous Resonance Stability Analysis's // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Sept/Oct 1980. Vol. PAS-99, no. 5. P. 1855–1863.

3. Pilotto L. A., Bianco A., Long W. F., Edris A. Impact of TCSC Control Methodologies on Subsynchronous Oscillations // IEEE Transactions on Power Delivery, January 2003.Vol. 18, no. 1. P. 243–252.

4. Nayfeh A. H., Harb A. M., Chin C. M., Hamdan A. M. A. Mili L. Application of Bifurcation Theory to Subsynchronous Resonance in Power Systems // International Journal of Bifurcation and Chaos. 1998. № 8(1). P. 157–172.

5. Belyaev A. N., Smolovik S. V. An Improvement of AC Electrical Energy Transmission System with Series Compensation by Implementation of Controllable Shunt Reactors // IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26 2003, Bologna, Italy.

6. Беляев А. Н. Снижение скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной электростанции // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 2. С. 124–132.

7. IEEE Sub-synchronous resonance working group. Second benchmark model for computer simulation of sub-synchronous resonance // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1985. Vol. PAS 104, no. 5. P. 1057–1066.

8. Федоров В. К., Рысев Д. В. Устойчивость энергосистемы турбина – генератор – нагрузка при возникновении электромеханического резонанса // Омский научный вестник. 2011. № 3(103). С. 194–198.

УДК 621.316.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ DIGSILENT POWERFACTORY

А. В. Симаков[1], О. А. Лысенко[2], М. Ю. Чернев[3]

[1]*Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия*

[2]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

[3]*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

Аннотация. **В статье представлены принципы моделирования устройств релейной защиты и автоматики в программном обеспечении. Целью работы являлось создание модели устройства автоматического ввода резерва (АВР) с пуском по напряжению и проверка корректности его работы. Построение модели выполнено в программном обеспечении DigSILENT PowerFactory. В ходе работы описаны принципы функционирования АВР, выполнено построение математической модели с помощью встроенных измерительных и логических блоков используемого программного обеспечения, осуществлен ввод уставок защиты и проверена корректность функционирования в статических и динамических режимах работы. Результатом работы является готовая математическая модель АВР для использования в последующем моделировании работы защит.**

Ключевые слова: релейная защита, АВР, моделирование, PowerFactory.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-98-102

I. Введение

Развитие промышленных мощностей требует особого внимания к устройствам защиты и автоматики, обеспечивающим бесперебойность энергоснабжения потребителя и защищающим энергосистему и электрооборудования от ненормальных режимов работы [1–3].

Согласно правилам устройства установок, существуют 3 категории потребителей: I, II и III [4]. Для электроприемников I категории перерыв электроснабжения может повлечь за собой опасность для жизни людей или серьезный ущерб для производства, поэтому они должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников питания с допустимым перерывом их электроснабжения только на время автоматического восстановления питания.

Для электроприемников II категории перерыв электроснабжения приводит к менее существенному ущербу для производства, чем в предыдущем случае. Эту категорию электроприемников рекомендуется обеспечивать электроэнергией от двух независимых источников питания с допустимым перерывом электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями специализированного персонала.

Электроприемники III категории – все остальные электроприемники, допустимый перерыв в их энергоснабжении не более суток.

В связи с отмеченным выше, особый интерес представляет надежность энергоснабжения потребителей первой категории, поэтому целью работы является моделирование устройства автоматического ввода резервного питания.

II. Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо определить принцип работы устройства автоматического ввода резерва, его функциональные, структурные и логические схемы. Также, следует выбрать программное обеспечение для моделирования, определить условия и уставки срабатывания защиты. Созданную модель устройства следует испытать при различных режимах работы и сделать заключение относительно его корректности.

Испытание производится на модели подстанции с одиночной секционированной системой шин, соединенных через секционный выключатель (рис. 1).

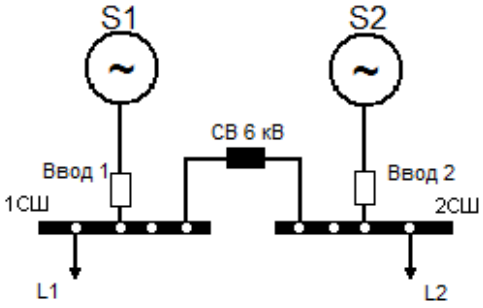


Рис. 1. РУ с одиночной секционированной системой шин

Программным обеспечением для моделирования выбран продукт DigSILENT PowerFactory – программное обеспечение для анализа систем электропитания, предназначенное для анализа систем генерации, передачи, распределения и промышленных систем. Он охватывает весь спектр функциональных возможностей – от стандартных функций до сложных и продвинутых приложений, включая ветроэнергетику, распределенную генерацию, моделирование в реальном времени и мониторинг производительности для тестирования и контроля системы [5].

III. Теория

Автоматическое включение резерва (АВР) – включение автоматическим устройством резервного оборудования взамен отключившегося основного [6]. Широко применяется в энергетике, служит для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. Общими требованиями к АВР являются быстрое включение резервного питания после отказа рабочего источника, селективность и однократность срабатывания [7].

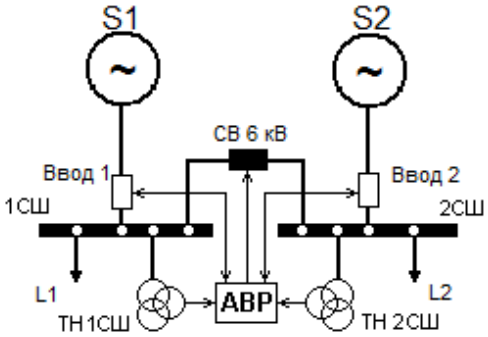


Рис. 2. Логическая схема работы устройства АВР

Схема распредустройства с АВР приведена на рис. 2, а на рис. 3 представлена логическая схема работы самого устройства АВР [8].

Питание поступает от двух независимых друг от друга источников S1 и S2 через вводные выключатели к нагрузкам L1 и L2. Устройство АВР через трансформаторы напряжения 1 и 2 секций шин контролирует уровни напряжения на шинах распредустройства.

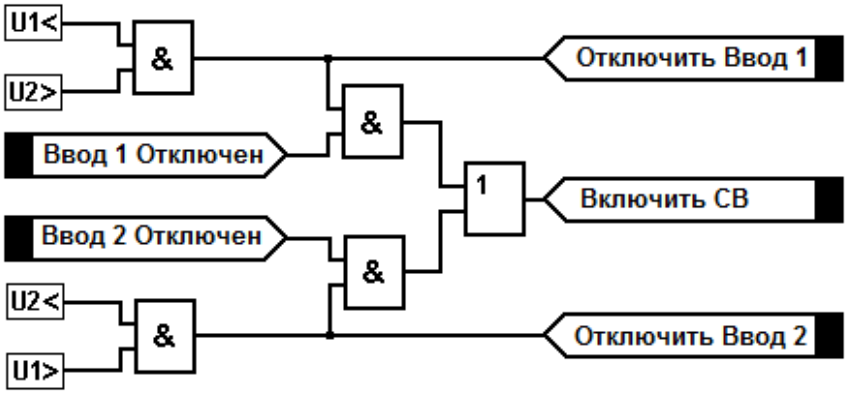


Рис. 3. Логическая схема работы устройства АВР

При снижении напряжения или полной потере питания, устройство АВР проверяет наличие достаточного уровня напряжения на другой секции шин. Если напряжение необходимой величины присутствует, осуществляется разрешение АВР, отправляется команда на отключение вводного выключателя, а после того, как устройство убедится в его отключении, следует команда на включение секционного выключателя [9].

IV. Результаты экспериментов

В результате эксперимента создана составная модель устройства АВР на основе логических блоков используемого ПО (рис. 4)

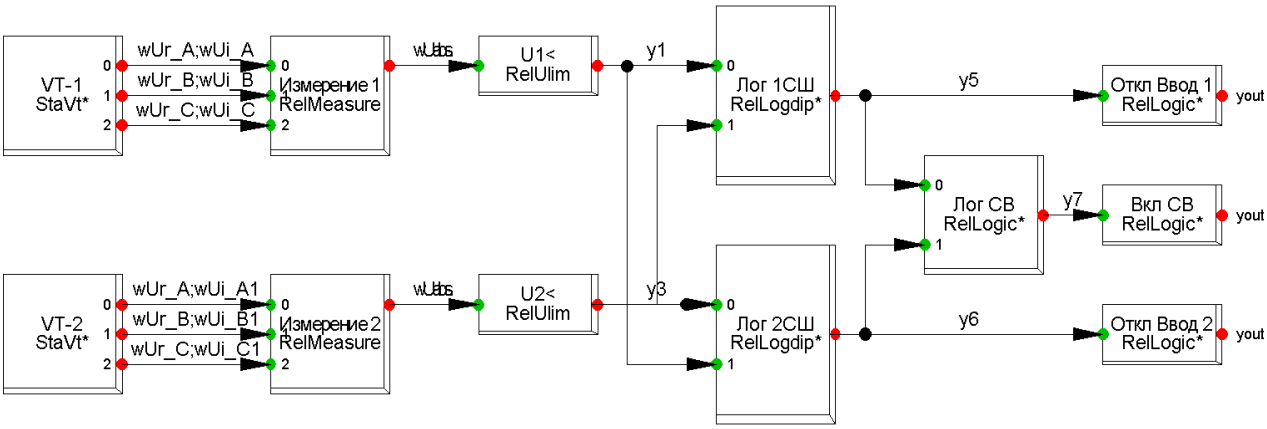


Рис. 4. Составная модель устройства АВР

С трансформатора напряжения (VT) на измерительный блок поступает величина линейного напряжения. В измерительном блоке она обрабатывается и выдается на релейный блок для выработки выходного сигнала. В случае, если величина не достигла уставки, на выходе релейного блока логический ноль, в противном случае логическая единица. Сигналы поступают на блоки логики, которые формируют команды на отключение соответствующих выключателей.

Данное устройство применено для оснащения математической модели распредустройства 6 кВ, схема которого была рассмотрена ранее. Модель включает в себя два источника питания, секционированную одиночную систему шин, пять выключателей, два трансформатора напряжения (не отображены) и две нагрузки (рис. 5).

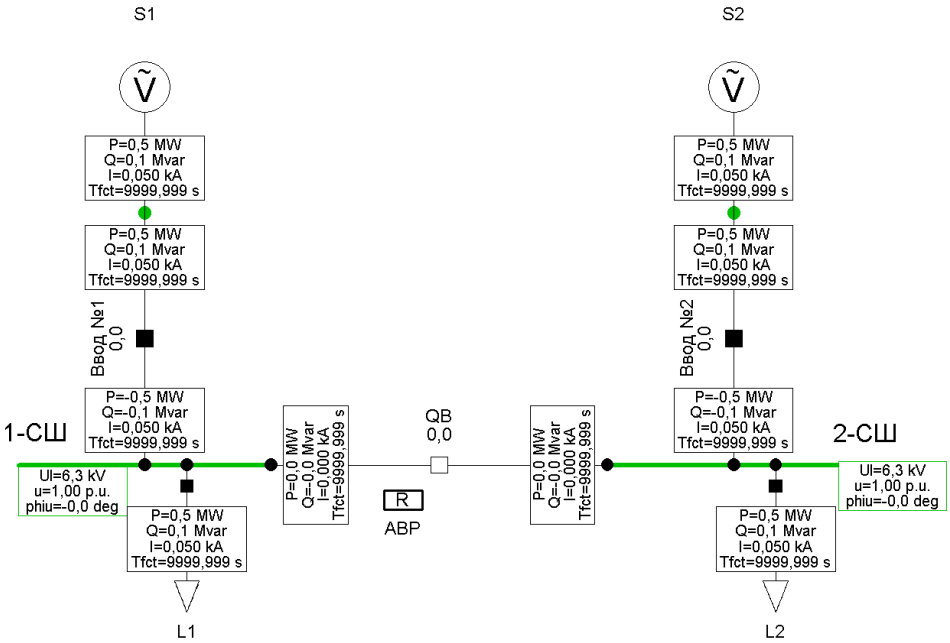


Рис. 5. Модель распредустройства 6 кВ

На рис. 5 представлен расчет схемы в установившемся режиме. Напряжение на шинах равно номинальному, ток нагрузки составляет 50А.

Выполним расчет схемы в статическом режиме при исчезновении питания на вводе от S1 рис. 6.

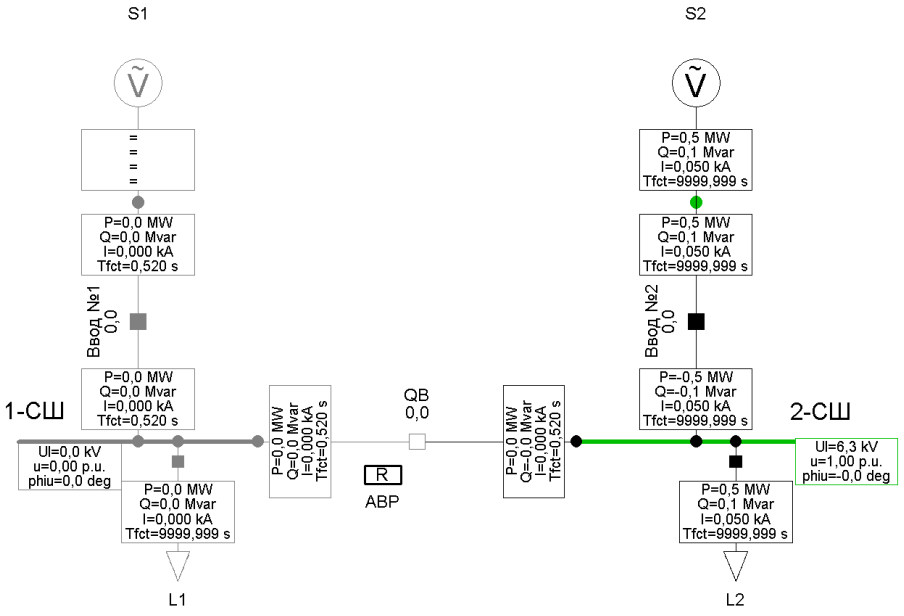


Рис. 6. Моделирование в статическом режиме

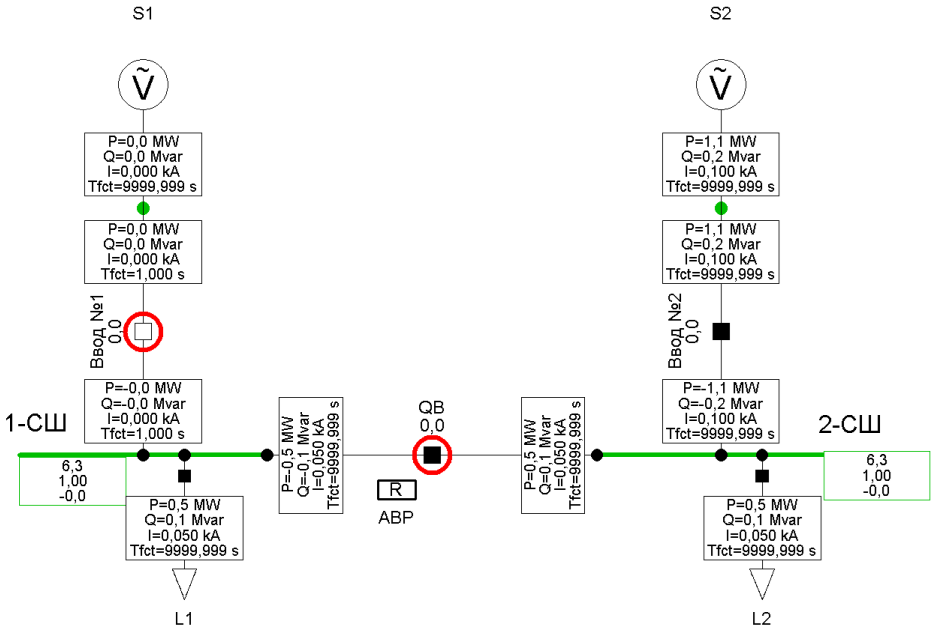


Рис. 7. Моделирование в динамическом режиме

На рис. 7 изображено моделирование схемы в динамическом режиме. В этом случае через 1с после запуска моделирования подается команда на вывод из работы источника S1. О срабатывании защит можно судить по изменению фактического положения выключателей.

V. Обсуждение результатов

При статическом моделировании потери напряжения на одном из вводов распредустройтва критерием, по которому можно заключить о работе защиты является время устранения повреждения (T_{fct}). При времени уставки 0.5с, защита отрабатывает за 0.52с, ввиду того, что по умолчанию учитывает собственное время выключателя. Как видно по рис.6, защита отключила вводной коммутационный аппарат и ввела в работу секционный выключатель. В случае с динамическим моделированием при потере питания на одном из вводов, через 1с

защита отключает вводной выключатель и включает секционный. Ток от первого источника увеличивается на величину нагрузочного тока резервируемой секции.

VI. Выводы и заключение

В ходе работы был выполнен литературный обзор, дано краткое описание принципам работы устройств автоматического ввода резерва, построена математическая модель рассмотренного устройства и проведено его испытание на виртуальном полигоне.

По итогам испытаний можно сделать вывод о корректности созданной модели и допустимости ее использования в дельнейшем моделировании работы устройств релейной защиты и автоматики. Результатом работы является отлаженная модель устройства автоматического ввода резерва с пуском по напряжению.

Преимуществом такого подхода является возможность определения параметров срабатывания защит при внешних авариях и достаточности работы защит с минимальными затратами ресурсов. По результатам моделирования возможно оценить целесообразность разработки корректирующих мероприятий, например применения быстродействующего АВР (БАВР).

Список литературы

1. Чебанов К. А., Бурляева В. А., Овчаренко В. Ю. Оптимизация и повышение эффективности функционирования предприятий электросетевого комплекса // Научный вестник Государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт». 2017. № 1. С. 33–39.

2. Дубицкий М. А. Надежность энергоснабжения и безопасность систем энергетики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 9 (80). С. 211–216.

3. Маренич М. К. Факторы обеспечения устойчивого развития электроэнергетической отрасли // Стратегия устойчивого развития в антикризисном управлении экономическими системами: сборник материалов IV Междунар. науч.- практ. конф. 2018. С. 199–206.

4. Правила Устройства Электроустановок (ПУЭ), издание седьмое. М.: НТЦ «ЭНАС», 2003.

5. DIgSILENT PowerFactory // Официальный сайт производителя ПО. URL: https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html (дата обращения: 01.04.2019).

6. Миниахметов А. А., Абдуллин С. А. Анализ главных параметров электросети при аварийных режимах в нефтяных предприятиях и использование средств автоматического включения резерва // Theoretical & Applied Science. 2018. № 1 (57). С. 227–234.

7. Шевырев А. С., Чернов Н. И., Вильданов Р. Г., Бузаева Е. К., Широбоков Е. Д. Анализ системы электроснабжения нефтеперерабатывающих заводов с целью внедрения быстродействующего автоматического включения резерва // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 10 (88). С. 57–60.

8. Васильева Т. Н., Хохликов А. А. Модель для исследования работы устройства автоматического включения резерва в системах электроснабжения // Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы: сборник статей победителей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 16–20.

9. Грыжов В. К., Корольков В. Г. Имитационное моделирование схем автоматического включения резерва и аварийных ситуаций на подстанции // Научные исследования: теория, методика и практика: сборник материалов II Междунар. науч.-практ. конфер. 2017. С. 216–228.

УДК-620.9

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

И. А. Степашкин, А. Г. Михайлов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

***Аннотация*. В статье рассмотрены характеристики энергетических топлив и рассмотрена их классификация. Особое внимание уделено топливу – углям Камышанского, Талдинского и Экибастузского месторождений, у которых значение золового остатка А изменяется от 16,4 до 43 %. Рассмотрено влияние величины А на значение низшей теплоты сгорания топлива, которая является определяющей характеристикой эффективности работы котла. Приведена графическая зависимость низшей теплоты сгорания от золового остатка для различных видов твердого топлива.**

Ключевые слова: твердое топливо, котел, низшая теплота сгорания, энергетическая установка.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-102-105

I. ВВЕДЕНИЕ

Различные технико-экономические факторы горючих веществ такие как: стоимость добычи топлива и его транспортировка, запасы топлива, тепловыделение на единицу объема или массы, реакционная способность топлива, отсутствие в продуктах сгорания различных вредных веществ, присутствие в топливе негорючих примесей, таких как вода и зола, доступность топлива для использования и т.д. Все эти факторы показывают целесообразность использования тех или иных горючих веществ в качестве топлива.

Все топливо по агрегатному состоянию подразделяется на 3 вида: твердое, жидкое и газообразное.

Все виды топлива в зависимости от способа получения делятся на естественные (органические) и искусственные. Естественное топливо – это топливо, добыча которого происходит в недрах земли, к такому топливу можно отнести: торф, древесину и др. К искусственному топливу относятся продукты термической переработки естественных топлив. Искусственное твердое топливо получают путем механической переработки, например: размол и брикетирование.

Органическое топливо является не только источником энергии, но оно также является важным сырьем для производства химической продукции. Большое количество ценных жидких и газообразных соединений, которые являются базовыми для производства многих химических продуктов. Природный газ, мазут и различные виды каменных углей находят применение в разных отраслях промышленности [1].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с разнообразием химического состава твердых топлив необходимо оценить эффективность каждого топлива в работе энергетических установок. Критерием оценки является низшая теплота сгорания, которая определяет значение КПД котла.

III. ТЕОРИЯ

В соответствии с существующей классификацией (ГОСТ 25543-2013 «Угли бурые, каменные и антрациты») ископаемые угли в зависимости от значения величины среднего показателя отражения витринита R_0, теплоты сгорании на влажную беззольную массу Q_s^{af} и выхода летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} подразделяются на бурые, каменные и антрациты (табл. 1) [5].

ТАБЛИЦА 1
ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕЙ

Вид угля	Средний показатель отражения витринита, R_0, %	Теплота сгорания на влажную беззольную массу, Q_s^{af} Мдж/кг	Выход летучих веществ на сухую беззольную массу, V^{daf}, %
Бурый уголь	Менее 0,60	Менее 24	-
Каменный уголь	От 0,40 до 2,59 включ.	24 и более	8 и более
Антрацит	От 2,20 и более	-	Менее 8

Бурые, каменные угли и антрациты обозначают семизначным кодовым числом (см. в ГОСТе) и в зависимости от их генетических параметров и технологических свойств объединяют в технологические марки, группы и подгруппы.

Бурые угли делятся по максимальной влагоемкости на беззольное состояние W_{max}^{af} на три группы: W_{max}^{af} 50 % и выше, второй бурый (2Б) – с W_{max}^{af} от 30 до 50 % и третий бурый (3Б) – с W_{max}^{af} менее 30 %.

Классификация каменных углей производится по выходу летучих веществ на сухую беззольную массу V^{daf} толщине пластического слоя *y* и индексу Рога RI. Антрациты делятся с учетом объемного выхода летучих веществ на сухую беззольную массу $V_{об}^{daf}$ и анизотрапии отражения витринита A_R. Подгруппа угля (витринитовая или фюзинитовая) определяется в зависимости от содержания фюэнннзнроваиных компонентов ∑ОК.

Приведенная классификация распространяется на неокисленные угли. Окисленные каменные угли Кузнецкого бассейна в зависимости от величины относительного уменьшения высшей теплоты сгорания на сухое

беззольное топливо $ОК_Q = \left[Q_s^{daf} - \left(Q_s^{daf}\right)_{ОК}\right] / Q_s^{daf}$ и количества выветренной массы угля $ОК_П$ делятся на две группы (ГОСТ 32356-2013) [6].

Первая группа окисленности характеризуется величиной $ОК_Q$ до 10 % н количеством выветренной массы угля $ОК_П$ до 50 %, ко второй группе относятся угли с $ОК_Q$= 10-25 % и $ОК_П$>50, Последние рекомендуется использовать в районах добычи и прилегающих к ним. При Q_s^{daf}<25,04 МДж/кг окисленные каменные угли могут быть использованы для факельного сжигания только по согласованию с потребителем в специально сконструированных топочных устройствах.

Окисленные угли отличаются также повышенной влажностью. Если в неокисленных углях значение W_t^r не должно превышать для марок К, Т 10,0 %; Г, А 11,0 %; Д, СС 12,0 %, т о в окисленных углях 1-й группы предельная величина W_t^r для марки Т 15,0 %; К, СС 18,0 %; Д 23,0 %, а в окисленных углях 2-й группы 27,0 %.

Минеральная часть твердого топлива делится на три группы:

- минералы, связанные с органической частью топлива или образующиеся при ее разложении в процессе углеобразования;
- минералы, занесенные в пласт топлива в результате геологических преобразований в процессе образования пласта;
- минералы горных пород, прилегающих к пласту топлива и занесенных в топливо при его выработке.

Первая группа минералов равномерно распределена по органической части топлива н является источником так называемой внутренней золы.

Вторая группа минералов в зависимости от равномерности их распределения по топливу может быть источником как внутренней, так и внешней золы.

Третья группа дает внешнюю золу.

Количество золы, получаемой при полном сжигании угля, не равно количеству содержащихся в угле минеральных примесей, В состав минеральной части топлива входят глинистые минералы, слюды, карбонаты, сульфаты, сульфиды и ряд других веществ [3].

Одним из основных показателей при делении углей на марки и определении степени метаморфизма является выход летучих веществ V^{daf}. При быстром нагревании частиц угольной пыли, характерном для пылеугольного сжигания, фактический выход летучих может превышать величину V^{daf} определенную стандартным анализом, в 1.3–1,5 раза.

Выход летучих и теплота их сгорания определяют реакционную способность топлива, прежде всего склонность к воспламенению угольной пыли. Тепловая ценность летучих (произведение $V^{daf} \cdot Q_{лет}$) характеризует, при прочих равных режимных условиях, время воспламенения частиц пыли. С ростом значения $V^{daf} \cdot Q_{лет}$ уменьшается время воспламениния угольной пыли.

Поскольку содержание внешнего балласта ($A^p + W^p$) подвержено изменениям в зависимости от условий хранения и способа добычи топлива, т.е. устанавливают глубину химических преобразований в топливе, т. е. вид этого топлива (бурый, каменный уголь, полуантрацит, антрацит) по процентному содержанию элементов в безводном и беззольном составе топлива. Такими массами являются условно горючая и органическая. Понятие горючей массы является условным, так как содержащийся в «горючей» массе топлива азот не горит, а кислород является окислителем и частично уже находится в соединении с другими горючими компонентами:

$$C^Г + H^Г + O^Г + N^Г + S^Г = 100\ \%. \quad (1)$$

В таблице 2 приведены примеры месторождения углей и их характеристики

ТАБЛИЦА 2
МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Бассейн, месторождение	Золовый остаток, А, %	Низшая теплота, $Q_Н^Р$,ккал/кг	Выход летучих, V^{daf}, %
Камышанский	16,4	5160	29
Талдинский	22	4700	39,5
Экибастузский	43	4000	24

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведена расчетная зависимость низшей теплоты сгорания от значения величины золового остатка для твердого топлива – Камышанский, Талдинский, Экибастузские угли.

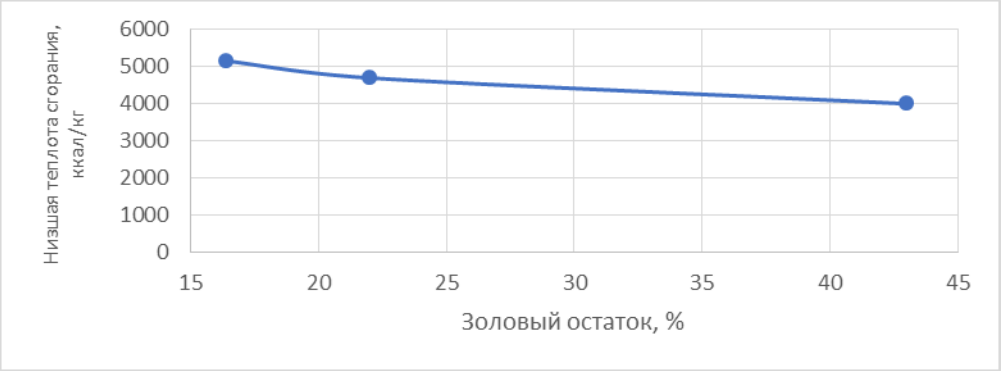


Рис. 1. Зависимость низшей теплоты сгорания от золового остатка

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении расчетных исследований уставлено, что с увеличением негорючей части (золового остатка А) наблюдается уменьшение низшей теплоты сгорания топлива $Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$, в связи с уменьшением суммарного значения горючей части и летучих веществ.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением негорючей части уменьшается значение низшей теплоты сгорания, что в целом влияет на эффективность работы энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лариков Н. Н. Теплотехника: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 432 с.
2. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
3. Вербовецкий Э. Х., Жмерик Н. Г. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб: НПО, ЦКТИ, 1996. 270 с.
4. Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Новикова Э. Э., Теребилов С. В. Численное моделирование процессов теплопереноса при турбулентном горении газового топлива в топочном объеме // Омский научный вестник. 2016. №2 (146). С. 66–68.
5. ГОСТ 25543-2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. Введ. 2015. 01.01.М.: Изд-во стандартов, 2015. 20 с.
6. ГОСТ 32356-2013. Угли каменные и антрациты окисленные Кузнецкого и Горловского бассейнов. Классификация. Введ. 2015-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2014. 7 с.

УДК 621.374

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, В. Е. Аникин, Г. О. Белявский, Б. В. Чижма
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Предложена методика построения многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства, предназначенного для очистки технологических поверхностей от налипаний сыпучих материалов. При построении схемы замещения используется метод затухания постоянного тока в электрической цепи дисковой катушки с якорем, в качестве которого используется пластина из дюралюми-**

ния. Расчет затухания постоянного тока в катушке с якорем рассматривается в пакете ELCUT как задача нестационарного магнитного поля с присоединенной электрической цепью. Варьируя расстояние между дисковой катушкой и якорем при расчете нестационарного магнитного поля, временная зависимость тока в катушке раскладывается на сумму двух экспонент. Экспоненциальные составляющие тока в катушке позволяют записать операторное сопротивление электрической цепи, а затем рассчитать сопротивления участков многоконтурной схемы замещения дисковой катушки с якорем в зависимости от расстояния между ними. Многоконтурная схема замещения электроимпульсного устройства очистки является основой построения математической модели для исследования переходного процесса, сопровождающегося высоковольтным разрядом конденсаторной батареи на катушку индуктора и исследования ударной волны в стенках технологического оборудования при их очистке от сыпучих материалов.

Ключевые слова: электроимпульсная очистка; катушка индуктора с якорем; электропроводная поверхность объекта воздействия, многоконтурная схема замещения.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-105-109

I. Введение

В электроимпульсных устройствах импульсы силы возникают в результате взаимодействия вихревых токов, индуцированных в якоре (токопроводяшей пластине), с мощными импульсами магнитного поля, созданного током большой плотности при высоковольтном электрическом разряде емкостного накопителя энергии (конденсаторной батареи) на катушку индуктора [1, 2]. Длительность процесса аккумулирования энергии, а затем ее выделение в чрезвычайно малые промежутки времени позволяет получить максимально возможные величины механического импульсного воздействия на очищаемую поверхность объекта воздействия. Исполнительным элементом в электроимпульсном устройстве является катушка индуктора с якорем, изготовленным из дюралюминиевой пластины. Индуктор катушки с якорем плотно прижимаются к стенке технологического оборудования с внешней стороны.

II. Постановка задачи

Эффективность работы электроимпульсных устройств очистки зависит от многих факторов, а именно: амплитуды и формы импульса электромагнитной силы, числа точек приложения силы, частоты воздействия. На оптимизацию режимов работы электроимпульсных устройств очистки оказывают влияние геометрические размеры исполнительных устройств очистки, обмоточные данные свойства токопроводящего материала для изготовления якоря, технологический зазор между катушкой индуктора и якорем.

Моделирование таких процессов возможно только при расчете нестационарного магнитного поля электроимпульсного устройства очистки с присоединенной электрической цепью, например с использованием профессиональной версии комплекса программ ELCUT 6.0. Однако этот путь сопровождается чрезмерно большими затратами машинного времени, что существенно усложняет решение вопросов оптимизации параметров электроимпульсного устройства очистки, вследствие перебора большого количества вариантов геометрии исполнительного элемента и обмоточных данных катушки индуктора. Поэтому возникает потребность воспользоваться хорошо разработанным аппаратом теории электрических цепей, а именно построением многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства очистки на основе расчета затухания постоянного тока в катушке индуктора с якорем [3, 4].

III. Моделирование

При моделировании нестационарного магнитного поля исполнительного элемента очистки в комплексе программ ELCUT изменялась величина технологического зазора между катушкой индуктора и якорем, изменяющемся в диапазоне от 0,5 до 5 мм с шагом 1 мм. Толщина токопроводящей пластины, изготовленной из дюралюминия, принималась в расчете 3 мм. При построении геометрии модели исполнительного элемента было учтено, что катушка индуктора является бескаркасной, намотана медным проводом сечением $2,0\times5,1\ \text{мм}^2$ и содержит при варьировании вариантов задачи 15, 20 и 25 витков. При решении задачи в пакете ELCUT принимается интегрирование по времени переходного процесса 0,6 мс, шаг интегрирования 0,01 мси время запоминания решения на шаге, равном шагу интегрирования. Емкость конденсатора равна 100 мкФ. Анализ результатов расчета нестационарного магнитного поля при затухании постоянного тока в электрической цепи индуктора с якорем позволяет получить параметры многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства очистки, показанной на рис. 1.

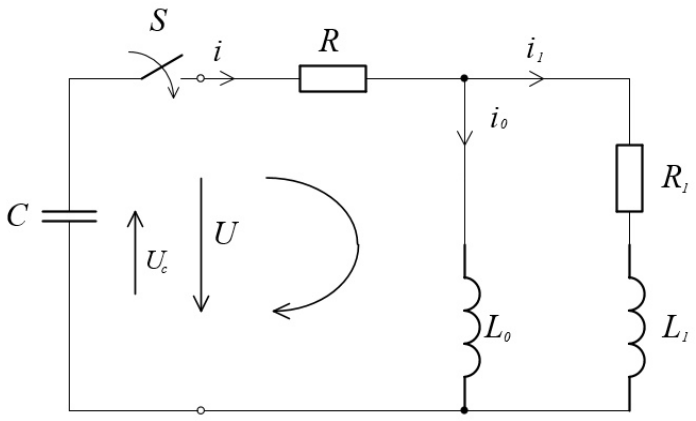


Рис. 1. Многоконтурная схема замещения электроимпульсного устройства очистки

Для того чтобы сократить время расчета оптимальных параметров импульса конденсатора и напряжения питания, необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} iR + \dfrac{d\psi_0}{dt} + U_c = 0 \\ iR + i_1 R_1 + \dfrac{d\psi_1}{dt} + U_c = 0 \\ i = i_0 + i_1 \end{cases}$$

где R – токоограничивающее сопротивление конденсатора; i_0, i_1, R определяются по затуханию постоянного тока, и их параметры зависят от зазора между индуктором и пластиной.

Полная система уравнений для анализа переходного процесса при высоковольтном разряде конденсаторной батареи на катушку индуктора с якорем имеет вид:

$$iR + L_0(\delta)\frac{\partial i_0}{\partial t} + i\frac{\partial L_0(\delta)}{\partial \delta} * V + U_c = 0$$

$$iR + i_1 R_1 + L_1(\delta)\frac{\partial i_1}{\partial t} * i_1\frac{\partial L_1}{\partial \delta} * V + U_c = 0$$

$$i = i_0 + i_1;$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{m}\left[F_{\text{эм}} - F_{\text{сопр}}\right].$$

Здесь обозначено $F_э$, $F_{\text{сопр}}$ – соответственно электромагнитная сила и сила сопротивления стенки технологического оборудования, подверженная очистке от сыпучих материалов.

Ток в конденсаторе

$$i = C\frac{\partial U_c}{\partial t} = i_0 + i_1;$$

Полная система уравнений электроимпульсного устройства очистки в форме Коши принимает вид:

$$\frac{\partial U_c}{\partial t} = \frac{1}{C}(i_0 + i_1);$$

$$\frac{\partial i_0}{\partial t} = \frac{1}{L_0(\delta)}\left[-U_c - i_0\frac{\partial L_0(\delta)}{\partial \delta} * V - R(i_0 + i_1)\right] = 0$$

$$\frac{\partial i_1}{\partial t} = \frac{1}{L_1(\delta)}\left[-U_c - i_1 R_1 - i_1\frac{\partial L_1}{\partial \delta} * V - R(i_0 + i_1)\right] = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{m_я}\left[F_{\text{эм}} - F_{\text{сопр}}\right]$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = V.$$

Решение системы уравнений производится при нулевых начальных условиях для токов в ветвях схемы и скорости якоря, начальном значении зазора между катушкой индуктора и якорем $\delta = \delta_{нач}$.

Напряжение на конденсаторной батарее в момент коммутации соответствует напряжению высоковольтного источника питания $U_c(0) = Uo$.

Электромагнитная сила, действующая на стенку технологического оборудования, определяется по изменению запаса энергии магнитного поля в магнитной системе от расстояния между катушкой индуктора и якорем:

$$F_{эм} = \frac{\partial W_{эм}}{\partial \delta};$$

Энергия, запасенная в системе индуктор токопроводная пластина (якорь) определяется по формуле.

$$W_{эм} = L_0(\delta)\frac{i_0^2}{2} + L_1(\delta)\frac{i_1^2}{2}.$$

Тогда электромагнитная сила будет

$$F_m = \frac{1}{2} i_0^2 \frac{\partial L_0}{\partial \delta} + \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial \delta}$$

Решением системы уравнений являются законы изменения токов в ветвях многоконтурной схемы замещения $i_0(t)$, $i_1(t)$, $i(t)$, электромагнитная сила $F_{эм}(t)$, зазор $\delta(t)$, скорость якоря $V(t)$

IV. Результаты моделирования

Расчетные кривые, определяющие зависимость параметров для схемы замещения исполнительного элемента очистки от величины зазора между катушкой индуктора и якорем, показаны на рис. 4.

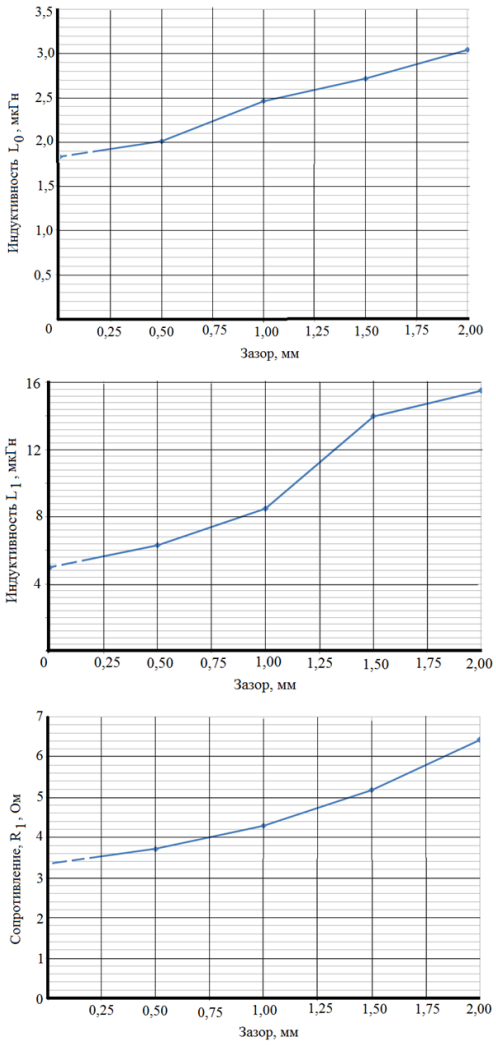


Рис. 4. Параметры схемы замещения электроимпульсного устройства очистки в функции от величины зазора между катушкой индуктора и якорем

V. Выводы

Предложент метод расчета динамических процессов в электроимпульсном устройстве, основанный на синтезе многоконтурной схемы замещения, параметры которой определяются в комплексе программ Elcut при решении задачи расчета нестационарного магнитного поля с присоединенной электрической цепью.

Список литературы

1. Шильников П. Ю., Захаренко В. А. Электроимпульсная очистка поверхностей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 1. С. 254–255.

2. Виноградов В. В., Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М. Методика расчета щелевого фильтра // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326, № 11. С. 67–73.

3. Татевосян А. С., Татевосян А. А., Захарова Н. В., Лукачева А. А. Определение параметров схемы замещения электроимпульсного устройства очистки поверхности от загрязнения // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 3 С. 102–108. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-102-108 .

4. Татевосян А. С., Чижма Б. В., Аникин В. Е., Белявский Г.О. Исследование влияния конструктивных параметров исполнительных элементов на работу электроимпульсных устройств очистки // Актуальные вопросы энергетики. 2018. С. 294–298.

УДК 621.314.261

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАТУХАНИЯ ТОКА СТАТОРА

Р. Н. Хамитов[1], В. В. Аникин[2]

[1]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

[2]*Нижневартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия*

Аннотация. **Надежное и энергосберегающее частотное управление погружными асинхронными электродвигателями требует исследование его работы в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов на базе моделирования. Данный подход ориентирован на разработку методов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Целью исследования являлась разработка методики для определения параметров Т-образной схемы замещения погружных асинхронных электродвигателей с использованием интеграла кривой затухания тока обмотки статора без дополнительного перехода к частотным характеристикам. Исследование методики проводилось на базе разработанной установки для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей. Для оценки достоверности методики идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием кривой затухания тока статора погружного электродвигателя был проведен эксперимент, показавший наибольшее расхождение между значениями параметров схемы замещения – не более 12 %. Разработанная методика идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя, таким образом, позволяет определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя.**

Ключевые слова: погружной асинхронный электродвигатель, схема замещения, переходная характеристика, интеграл кривой затухания тока, схема включения.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-109-113

I. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в предэксплуатационной идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя (ПЭД) возникает при частотном и векторном регулировании скорости вращения и электромагнитного момента ПЭД для организации надежных и оптимальных режимов эксплуатации в составе электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1].

Методы идентификации, связанные с вращением ПЭД на поверхности, требует для своей реализации использования совместимого с конструкцией ПЭД оборудования, заменяющего реальную нагрузку на валу в виде УЭЦН, либо наличия дорогостоящих специализированных стендов для приемо-сдаточных испытаний, которы-

ми оснащаются заводы - изготовители ПЭД. Однако имеется возможность усовершенствования подхода на базе методик параметрической идентификации непосредственно по кривой затухания тока обмотки статора, не требующих трудоемкого и сложного дополнительного перехода к частотным характеристикам.

Однозначная связь параметров схем замещения ПЭД с кривой затухания тока статора делает возможной идентификацию параметров ПЭД без трудоемкого перехода к частотным характеристикам электродвигателя. В научной и технической литературе данная актуальная задача и разработка технических средств её реализации применительно к асинхронным ПЭД в составе ЭТК УЭЦН достаточного рассмотрения не получила.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При рассмотрении характеристики затухания тока обмотки статора погружного асинхронного электродвигателя (ПЭД), полученной в ходе опыта при неподвижном роторе, возможно выделить (рис. 1) пологую (хвостовую) часть, крутой участок и «сверхпереходную» быстро затухающую начальную область.

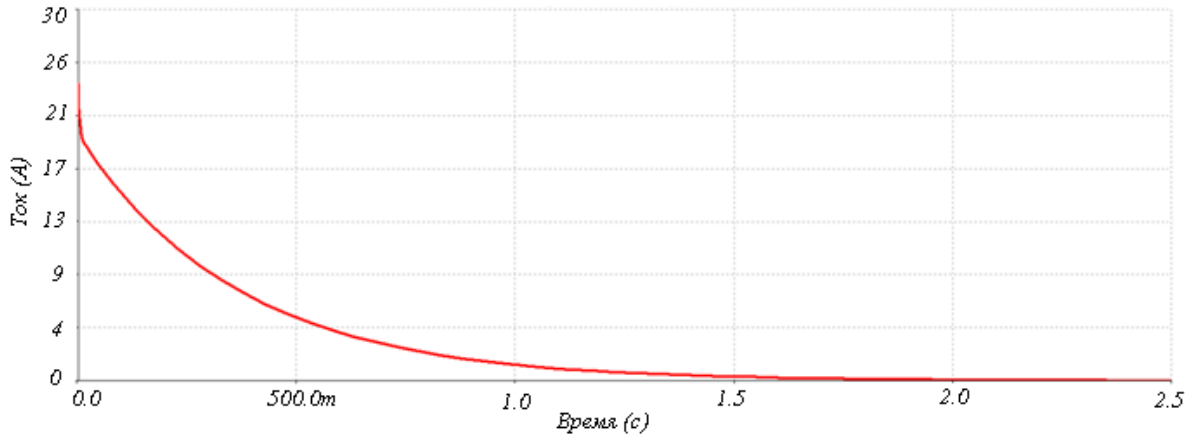


Рис. 1. Характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД

Эти особенности переходной характеристики затухания позволяют составить эквивалентные схемы замещения ПЭД (рис.2) с заторможенным ротором в отдельности для пологого, крутого и «сверхпереходного» участков характеристики затухания [2].

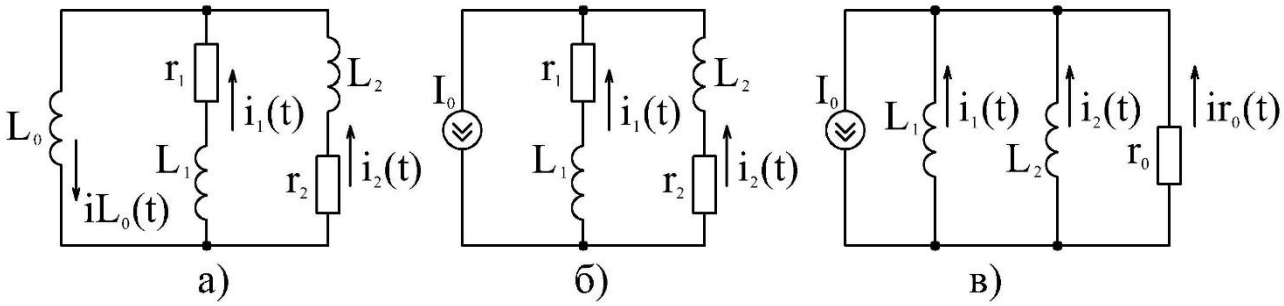


Рис. 2. Эквивалентные схемы ПЭД: а) на пологом участке кривой затухания тока статора, б) на крутом участке кривой затухания тока статора, в) на сверхпереходном участке кривой затухания тока статора в области малых времен

Эквивалентные схемы (рис. 2а, б), соответственно для пологого и крутого участков кривой затухания тока статора АД, построены на базе соотношений $r_0 \gg r_1$, $r_1 \gg R_{вн.}$, $r_0 \gg r_2$, $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$, позволяющих без какой-либо значительной ошибки пренебречь:

– влиянием сопротивления r_0, сопротивлением внешней цепи $R_{вн.}$, на постоянную времени T_1 (рис. 2, а) экспоненты, аппроксимирующей пологий участок характеристики $i_{эксп}(t)$, который обусловлен процессами гашения энергии магнитного поля АД на сопротивлениях r_1 и r_2;

– влиянием индуктивности L_0 и сопротивлений $R_{вн.}$, r_0 на постоянную времени экспоненты T_2, (рис. 2б) аппроксимирующей крутой (миллисекундный) участок огибающей переходной характеристики $i_{эксп}(t)$, кото-

рый связан с электромагнитными процессами проникновения магнитного поля рассеяния обмотки статора АД в заторможенный ротор.

Основанием для эквивалентной схемы (рис. 2 в) являются неравенства $L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \gg r_1 \cdot i_1(t)$, $L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \gg r_2 \cdot i_2(t)$, справедливые на сверхпереходном (десятки микросекунд) участке характеристики $i_{эксп}(t)$ и соотношения $L_0 \gg L_1$ и $L_0 \gg L_2$, которые дают возможность с очень хорошим приближением не учитывать влияние индуктивности L_0 и сопротивлений r_1 и r_2 на величину постоянной времени T_3 сверхпереходной аппроксимирующей экспоненты кривой затухания тока $i_{эксп}(t)$. Вследствие этого практически точное выражение для постоянной времени T_3 аппроксимирующей экспоненты принимает следующий вид:

$$T_3 = \frac{L_1 \cdot L_2}{r_0 \cdot (L_1 + L_2)}. \tag{1}$$

На основании эквивалентной схемы (рис. 2а) с учетом соотношения $(L_0 + L_1) \approx (L_0 + L_2)$ постоянная времени для медленно спадающего тока на конечном участке переходной характеристики $i_{эксп}(t)$ выражается с хорошей степенью приближения через эквивалентные параметры электродвигателей следующим образом:

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot (L_0 + L_1)}{r_1 \cdot r_2} \tag{3}$$

С учетом формулы

$$L_0 + L_1 = \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{эксп}(t)dt}{I_0}, \tag{4}$$

получается другое выражение для постоянной времени T_1 в иной, более удобной для применения форме [2]

$$T_1 = \frac{(r_1 + r_2) \cdot \int_0^\infty i_{эксп}(t)dt}{I_0 \cdot r_2}. \tag{5}$$

Эквивалентная схема ПЭД на рис. 2б, соответствующая крутому участку переходной характеристики затухания тока статора ПЭД, позволяет выразить постоянную времени T_2 аппроксимирующей экспоненты следующим образом

$$T_2 = \frac{(L_1 + L_2)}{r_1 + r_2}. \tag{6}$$

III. ТЕОРИЯ

Определение параметров схемы замещения ПЭД.

Из уравнения 4 определяется индуктивность ветви намагничивания эквивалентной схемы ПЭД

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{эксп}(t)dt}{I_0} - L_1, \tag{7}$$

которую с очень хорошим приближением можно принять равной

$$L_0 = \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{эксп}(t)dt}{I_0} \tag{8}$$

Из уравнения (5) находится приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора ПЭД

$$r_2 = \frac{r_1 \cdot \int_0^\infty i_{эксп.}(t)dt}{I_0 T_1 - \int_0^\infty i_{эксп.}(t)dt} \tag{9}$$

Сумма индуктивностей рассеяния обмотки статора и приведенной к обмотке статора индуктивности рассеяния обмотки ротора ПЭД определяется по эквивалентной схеме (рис. 2б) и уравнению 6 как

$$L_2 + L_1 = T_2 \cdot (r_1 + r_2) \tag{9}$$

Сопротивление активных потерь в параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД выражается (рис. 2в) через постоянную времени сверхпереходного участка кривой затухания $i_{эксп}(t)$ тока статора.

$$r_0 = \frac{L_1 \cdot L_2}{T_з \cdot (L_1 + L_2)}, \tag{9}$$

где разделение $L_1 + L_2$ на L_1 и L_2, необходимое в частности для определения сопротивления r_0 параллельной ветви намагничивания схемы замещения ПЭД, может быть выполнено следующим образом:

– путем вычисления L_1 с использованием результатов первого измерения тока $i_{эксп}(t_1)$ в момент времени t_1

$$L_1 = \frac{I_0 r_1 t_1}{I_0 - i_{эксп}(t_1)}; \tag{10}$$

– выбором с учетом рекомендации [3] $L_1 = L_2$, что можно считать допустимым, поскольку влияние r_0 на величину и расположение пространственных векторов напряжения, тока и потокосцепления асинхронных электродвигателей незначительно [4];

– снятием и регистрацией двух характеристик затухания тока статора, одну из которых получают при соединении обмоток статора ПЭД по схеме неполной звезды (рис. 3а), а другую – по схеме встречного соединения двух фаз (рис. 3б) при разомкнутой третьей фазе.

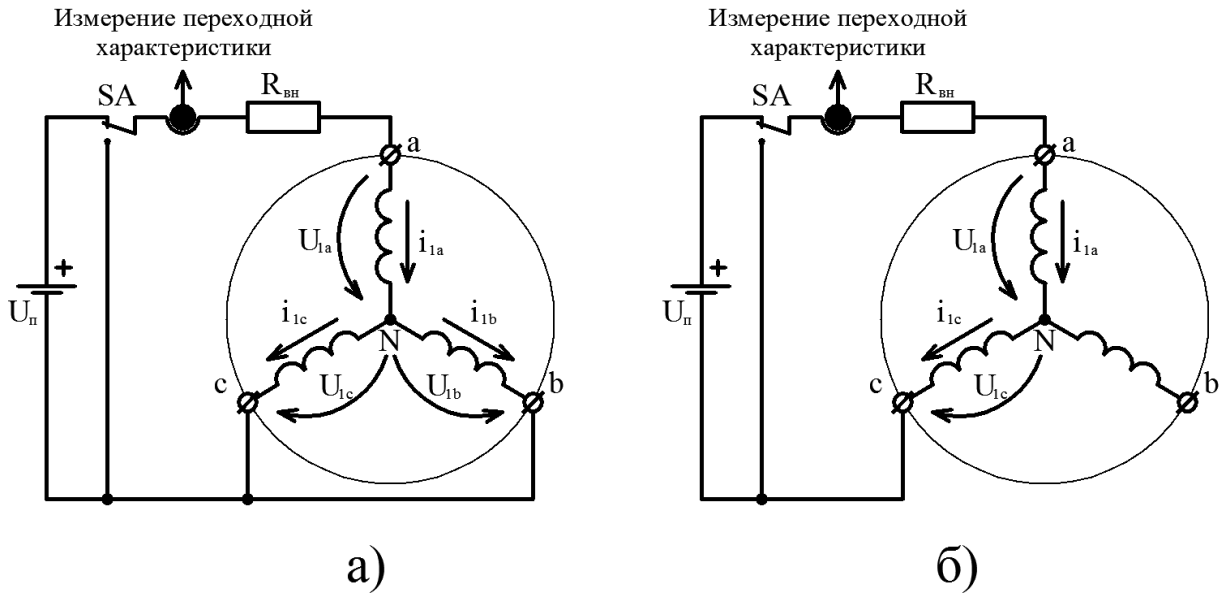


Рис. 3. Схемы соединения обмоток двигателя при получении переходной характеристики ПЭД

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для оценка достоверности методики идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием кривой затухания тока статора ПЭД был проведен эксперимент по идентификации параметров схемы замещения ПЭД типов ЭД(Т) – ЭД(Т)12-117-380. Эксперимент проводился на разработанной установке для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей [5]. Результаты представлены в табл. 1 вместе с известными значениями параметров схем замещения ПЭД, полученными по каталожным данным двигателя.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ПЭД ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Параметры Двигатель	r_2, Ом	L_1, мГн	L_2, мГн	r_0, Ом	L_0, мГн	I_0, А	r_1, Ом
ЭД(Т)12-117-380						10,5	0,517
каталог	1,945	2,937	2,937	323,3	115,2		
эксперимент	2,276	3,041	3,252	343,72	116,1		
погр. δ,%	12,0	3,5	10,7	6,3	0,8		

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эксперимент показавший наибольшее расхождение между значениями параметров схемы замещения – не более 12 % (сопротивление роторной цепи), наименьшее расхождение между значениями параметров схемы замещения – 0,8 % (индуктивность цепи намагничивания), что является приемлемым для целей оценки качества послеремонтных ПЭД в условиях работы сервисных и ремонтных организаций и непосредственно на кустовой площадки нефтедобычи.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя, таким образом, позволяет определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя в составе ЭТК УЭЦН в зависимости от его скольжения [6]. Методика, реализованная в виде программного продукта [7], целесообразна для применения на предприятиях по ремонту погружного электрооборудования и для определения измененного технического состояния ПЭД после ремонтного обслуживания и контроля его эксплуатационных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В. З., Мальгин Г. В., Архипова О. В. Математическое моделирование электротехнических комплексов нефтегазодобычи в задачах энергосбережения. Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2008. 221 с.

2. Пат. 2623834 РФ, МПК G 01 R 27/26. Способ определения электромагнитных параметров асинхронных электродвигателей / Кузнецов Е. М., Ковалев А. Ю., Аникин В. В. № 2016104186; заявл. 09.02.16; опубл. 29.06.17, Бюл. № 19.

3. Кади-Оглы Е. Ф. Сравнительный анализ и оценка эффективности способов регулирования погружных асинхронных двигателей: дис…. канд. техн. наук. СПб, 2002. 134 с.

4. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.

5. Ковалев А. Ю., Кузнецов Е. М., Аникин В. В. Установка для определения параметров схем замещения асинхронных электродвигателей // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 3. 162 с.

6. Ковалев В. З., Хамитов Р. Н., Кузнецов Е. М., Аникин В. В., Бессонов В. О. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения // Омский научный вестник. 2018. № 6. С. 36–40.

7. Аникин В. В., Кузнецов Е. М., Ковалев В. З. Идентификация параметров схемы замещения погружного асинхронного электродвигателя: свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 23747 от 27.08.2018. М. : ОФЭРНиО, 2018.

УДК 621.317

ВОЗМОЖНОСТЬ УЧЕТА КОРРЕКТИРУЩЕГО КОЭФФИЦИЕНТА УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Д. С. Баранов, С. С. Колмогорова[1], А. С. Колмогорова, С. В. Бирюков[1,2]
[1]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*
[2]*Сибирский автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия*

Аннотация. **Датчики электромагнитных полей используются в различных условиях, в том числе промышленные, водные и воздушные среды, бытовые. В статье рассматривается необходимость и возможность реализации учета коэффициента условий эксплуатации при разработке датчиков напряженности электромагнитных полей. Корректирующий коэффициент учитывает разные диэлектрические проницаемости основы датчика и условий применения сенсоров электромагнитных полей. В результате при проектировании реальных систем для измерения параметров электромагнитных полей необходимо вносить корректирующий коэффициент в результирующее уравнение. С учетом этого возможно улучшить метрологические характеристики сенсоров**

Ключевые слова: электрометрические измерения, напряженность электромагнитные поля, условия применения, коэффициент эксплуатации, сенсор.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-114-116

I. Введение

Применение точных измерительных преобразователей необходимо в разных сферах жизнедеятельности, поэтому измерения электромагнитных полей остается актуальной задачей. Условия работы измерительных преобразователей с датчиками электромагнитных полей постоянно меняются и, соответственно, возникают влияющие факторы на результаты.

В связи с тем, что использование сенсоров происходит в различных условиях необходимо учитывать условия эксплуатации датчиков при их разработке. Большое разнообразие устройств [1–3, 5] не учитывают условия использования датчиков, которые могут быть резко меняющимися и вносить в результат измерений погрешность.

II. Постановка задачи

Разработка и применение датчиков электромагнитных полей подразумевает учет всех влияющих факторов. Они влияют и на конструкции корпуса, форму чувствительных элементов, методики измерений и др. Именно поэтому изучая требования к первичным измерительным преобразователям, а также условия эксплуатации приборов необходимо обратить внимание на отсутствие корректировки на различие диэлектрической проницаемости корпуса датчика и измеряемой среды, влияющие на результат измерения и учесть его в базовой составляющей математического уравнения в виде вводимого коэффициента в зависимости от среды.

III. Теория

Электродная система из двух полых сферических сегментов представлена на рисунке 1. Величины зарядов, которые индуцируются на чувствительных элементах датчика, формируются внешним измеряемым однородным полем и определяется по формуле:

$$Q = \iint_{dS} \sigma \, dS \tag{1}$$

Заряды на чувствительных элементах S'_1 и S'_2, расположенных диаметрально противоположно на сферическом корпусе датчика. На основании базовых математических закономерностях, получили формулы для зарядов дифференциальных чувствительных электродов Q_1 и Q_2 [4]:

$$Q_1 = 4\pi\varepsilon_0 a \int_0^{\theta'_{01}} f_1(t) \cos\frac{t}{2} dt \tag{2}$$

$$Q_2 = 4\pi\varepsilon_0 b \int_{\theta'_{02}}^{\pi} f_2(t) sin\,\frac{t}{2} dt \quad (3)$$

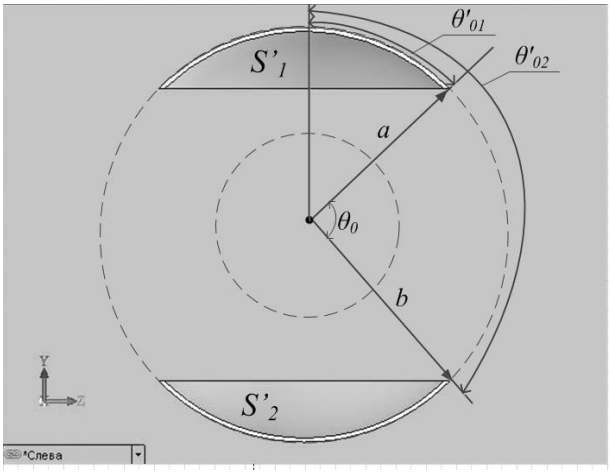


Рис. 1. Электродная система из двух полых сферических сегментов S'_1 и S'_2, выполнены для наглядного отображения разного размера θ'_{01} и θ'_{02}

При расчете параметров сферических сегментов датчика рассчитывались при условии, что диэлектрическая проницаемость ε_i корпуса не отличается от диэлектрической проницаемости ε_e внешних условий. В случае если отличие большое, то показания результатов измерений будут отличаться от истинных значений измеряемой величины. Величину такого отличия можно оценить по результатам расчета. При определении параметров датчика (рис. 1) с электродами в форме полых сферических сегментов, внутри которых расположена сфера радиуса *R*, имеющая диэлектрическую проницаемость ε_1.

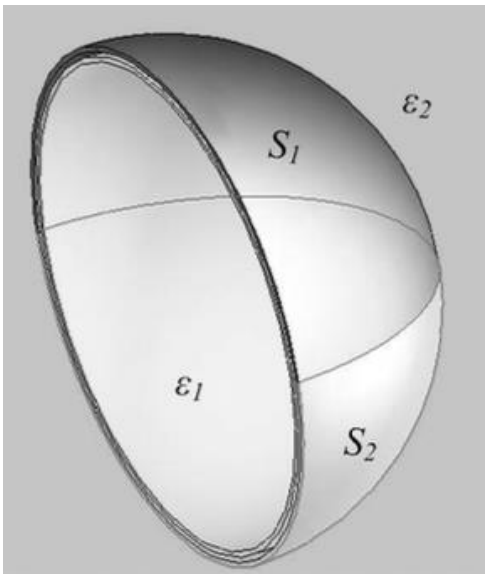


Рис. 2. Однокомпонентный датчик напряженности электрического поля с элементами, в форме полых сферических сегментов: *S1* – первый чувствительный элемент, *S2* – второй чувствительный элемент ε_1 – диэлектрическая проницаемость внутри корпуса датчика, ε_2 – диэлектрическая проницаемость эксплуатационной среды

При разработке математической модели функционирования в средах с различными диэлектрическими проницаемостями, ввели коэффициент:

$$\mu = {}^{\varepsilon_1}/_{\varepsilon_2} \quad (4)$$

Этот коэффициент учитывает соотношения диэлектрических проницаемостей корпуса датчика и среды использования, позволяющий вносить корректирующие параметры для учета эксплуатационных условий.

IV. Результаты экспериментов

В работе [4] была представлена полная математическая модель в редакторе *MathCAD*. Модель отражает взаимодействие сенсора с электрическим полем. В основу математической модели положена система уравнений (1) и (2), а также коэффициент μ (4). Математическая модель позволила установить зависимость нормируемого значения энергии в единице объема сенсора от геометрических размеров его сферических сегментов (θ_{01} и θ_{02}) при различных соотношений диэлектрических проницаемостей корпуса сенсора и окружающей среды, выраженных коэффициентом μ (4). График зависимости показан на рис. 3.

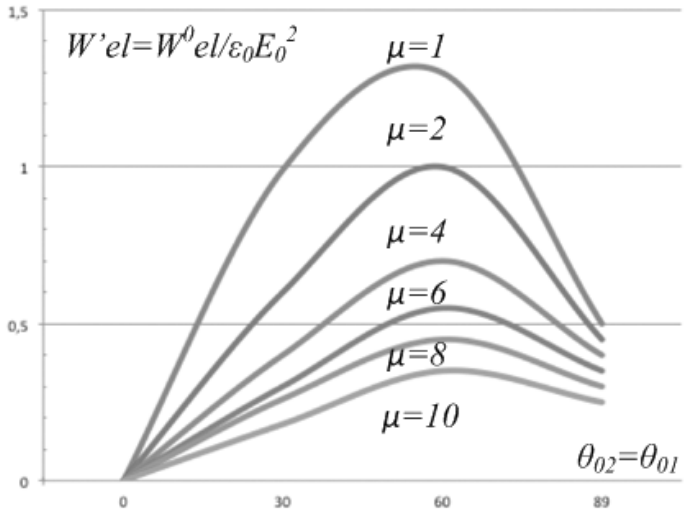


Рис. 3. График зависимости $W_{эл}^{0} = f(\mu, \theta)$

V. Обсуждение результатов

При измерении в реальных условиях диэлектрическая проницаемость среды может много отличается от диэлектрической проницаемости корпуса датчика и чувствительных элементов, именно поэтому важно учитывать корректирующий коэффициент на диэлектрическую проницаемость материала датчика и его влияние на результат измерения истинных значений электрических величин.

VI. Выводы и заключение

В результате работы получили, что диэлектрическая проницаемость материалы корпуса датчика влияет на чувствительность, поэтому выбор материла корпуса определяет размер его электродов, и чем больше диэлектрическая проницаемость материала корпуса датчика, тем больше должен быть угловой размер чувствительного электрода.

Список литературы

1. Колмогоров А. С., Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Современное представление сенсоров электромагнитных полей, средств измерения на их основе и областей применения в различных условиях // Ученые Омска – региону: материалы III Региональной науч.-техн. конф. 2018. С. 11–16

2. Пат. 181781 Российская Федерация, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Колмогорова С. С., Блесман А. И. № 2018115125; заявл. 23.04.2018; опубл. 26.07.2018, Бюл № 21.

3. Пат. 175646 РФ, МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / Бирюков С. В., Колмогорова С. С. № 2017131994; заявл. 12.09.2017; опубл. 13.12.2017, Бюл. № 35.

4. Колмогоров А. С., Колмогорова С. С., Бирюков С. В. Эксплуатационные обстоятельства в разработке и применении инвариантных сенсоров электромагнитных полей // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 4. С. 227–232.

5. Колмогоров А. С., Колмогорова С. С., Зверев А. И. Измерения напряженности электростатического поля в нефтегазовой промышленности // Метрология, стандартизация и управление качеством: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. 19–21 апр. 2017 г. / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 28–29.

УДК 621.382.029.64

РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ СВЧ ДИАПАЗОНА

А. Л. Ворожцов
АО «Центральное конструкторское бюро автоматики», г. Омск, Россия
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Статья посвящена актуальным проблемам перехода к стандартизированным технологическим процессам в отечественной радиоэлектронной промышленности. Затронуты аспекты IDM (Integrated device manufacturer) и fables/foundry моделей организации мирового производства ЭКБ. Отмечены некоторые ключевые препятствия к дальнейшему развитию отечественной технологии СВЧ электроники.**

Ключевые слова: стандартизированный технологический процесс, модель fables/foundry, отечественная ЭКБ СВЧ.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-117-120

I. Введение

С 50-х годов прошлого века и по настоящее время мировая электронная промышленность претерпела несколько качественных изменений в организации разработки и технологии производства радиокомпонентов. Можно выделить два этапа в развитии полупроводниковой промышленности – 30-летний этап становления, завершенный в середине 80-х годов прошлого века, и современный этап, протекающий по настоящее время. [1]

На первом этапе предприятия следовали принципу «самодостаточности» с низкой долей кооперации внутри отрасли. Электронные устройства и сервисы только начали проникать в жизнь большинства людей. Поэтому номенклатура выпускаемых компонентов была относительно невелика при достаточно больших тиражах. В первую очередь решались проблемы модернизации средств связи в армейских и силовых подразделениях, и постепенно шло внедрение электронных устройств в бытовые приборы и развития массового гражданского рынка. Перед предприятиями того периода ставились задачи создания устройств со строго заданными характеристиками, ориентированными на массовое производство. Условно такой подход к созданию новых компонентов можно охарактеризовать как главенство конструкции над технологичностью. Процесс разработки был основан на адаптации базовых технологий (прототипов) к индивидуальным технологическим маршрутам для производства конкретного изделия. Значительные затраты на обязательные корректировки технологических процессов в рамках этой адаптации для изготовления какой-либо уникальной конструкции оправдывались её массовыми тиражами. Ориентация на массовый выпуск продукции ставила перед предприятиями электронной промышленности задачу увеличения производственных мощностей и монополизации захваченных сегментов рынка. При этом на предприятиях нередко создавались участки по производству и осваивались технологии традиционно смежных отраслей в стремлении замкнуть технологический цикл изготовления всего изделия в рамках одного предприятия или корпорации. В англоязычной литературе такая модель организации бизнеса в полупроводниковой промышленности носит названия IDM (Integrated Device Manufacture, «комплексный производитель). В результате уже в 70-х годах рынок электронных СВЧ компонентов контролировали несколько корпораций - гигантов, таких как Texas Instruments, Siemens и т.д. Создание научно-технологических кластеров (технополисов), таких как Силиконовая (кремниевая) долина в США или наукограды в Советском Союзе, вполне соответствовали духу эпохи. Это было разумно и оправдано.

Второй этап принято отсчитывать с 90-х годов, когда ситуация на рынке кардинально поменялась. Во-первых, значительно выросла номенклатура выпускаемых изделий и область их применения, а во-вторых, значительно снизились тиражи для каждой новой модели изделия. Это потребовало глубокого переосмысления и изменения организации поиска, а также производства новых конструкций и решений. Если во главу угла ранее ставилась разработка конструкции нового изделия, то теперь основные ресурсы стали направляться на достижение технологичности новых разработок, т.е. минимизации затрат при удовлетворительной воспроизводимости. Повышение функционала новых устройств и компонентов усложняло конструкцию, а значит и технологию их изготовления, в то время как массовый гражданский рынок требовал значительного снижения себестоимости продукции предприятий электронной промышленности и времени её выхода на рынок. Снижение затрат на разработку и внедрение в серию, а также ускорение выхода на рынок требовало уменьшения технологического цикла, особенно на этапе разработки изделия, при том что сложность изделий неизменно возрастала, а тираж и время уменьшались. Выходом из этой противоречивой ситуации стал отказ от попыток сделать всё своими силами, и появление новых организационных подходов в разработке новых технологий, а именно появление «fables/foundry» предприятий.

II. Постановка задачи

В настоящее время можно отметить существование в производстве СВЧ ЭКБ (электронной компонентной базы) трёх организационных моделей.

Во-первых, это IDM (Integrated Device Manufacture) модель, которая практически сдала свои позиции по всему миру, за исключением нескольких корпораций-гигантов, таких как Intel, и подавляющего большинства отечественных предприятий размерами поменьше. В отечественной терминологии организации микроэлектронного производства к модели IDM ближе всего по значению понятия «научно-технологический комплекс» или «технопарк».

Во-вторых, это «fables» («бесфабричная») – модель, при которой компания-производитель радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) специализируется только на разработке, проектировании и продаже изделий, но не имеет собственных производственных мощностей. Одним из основоположников такого подхода стала компания Xilinx, образованная в 1984 и контролирующая сегодня половину мирового рынка программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). В отечественной терминологии модель «fabless» чаще всего звучит как «дизайн-центр» или, если точнее сказать, «дизайн-центр кристального уровня».

В-третьих, это «foundry» («кремниевая мастерская») – модель, при которой компания не занимается проектированием или продажей конечных изделий, а концентрируется главным образом на изготовлении пластин с элементами и последующим их тестированием. Ставшей первой такой в мире «независимой фабрикой» принято считать тайваньскую компанию TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation), основанную в 1987 г. В отечественной терминологии такая модель чаще всего звучит как калька с английского – «фаундри».

Смена приоритетов и отказ от итерационного подхода модели IDM, заключающегося в многоэтапной взаимной отработке новых конструктивно-технологических решений на каждом этапе разработки, и переход к внедрению некоторого отработанного ранее набора унификаций модели foundry сделали возможным идеологию «first pass success – успех с первой попытки», означающий по факту полное исключение из процедуры разработки итерационных циклов подгонки и многочисленной отработки конструкций, технологических маршрутов и параметров, условий и режимов отдельных операций для каждой новой модели.

Ключевым моментом в переходе от IDM к fabless/foundry стало изменение и расширение понятия «базовый технологический процесс» (baseline process) – от прототипа или типового процесса к процессу стандартизированному. Теперь помимо самого технологического процесса как набора технологических операций и правил контроля их результата, в базовом (стандартизированном) процессе обязательно наличие библиотеки стандартных элементов, правил проектирования и инструмента проектирования (PDK) [2]. Причем PDK (process design kit) с библиотекой стандартных элементов, как правило, сопряжен с какой-либо системой автоматизированного проектирования ВЧ и СВЧ устройств с функцией 3D электромагнитного анализа, таких как NI AWR DE, Keysight ADS и т.п. Успех проектирования главным образом зависит не только от качества «3D-решателя» какой-либо САПР или доступной вычислительной мощности при этом, но и от начальных условий для моделирования, а именно уровня описания элементарных тонкопленочных элементов достигнутых технологией.

III. Теория

Для лучшего понимания причины неизбежного изменения роли технологии в моделях IDM и fables/foundry следует максимально упростить организацию процесса создания нового изделия и сосредоточить внимание только на уровнях конструирования и технологии изготовления, особенно на условном «интерфейсе» взаимодействия между ними на этапе проектирования. Таким «интерфейсом» можно назвать в модели IDM – базовый чертеж, а в fables/foundry – PDK. Ключевое отличие базового чертежа от PDK – «глубина» описания элементарного тонкопленочного элемента.

Базовый чертеж, формируемый на базе типовых процессов, содержит описание двумя группами параметров. Во-первых, это «геометрические» параметры, т. е. физические размеры элементов: длина, ширина, высота (толщина) и расстояния между ними. Во-вторых, это «электротехнические» параметры – электрическое сопротивление, индуктивность, ёмкость элемента. При этом нужно сказать, что если геометрическими параметрами заданы все интегральные элементы, сформированные на пластине, то электротехническими описывают не в полной мере и не каждый элемент. Главное допущение, характерное для базовых чертежей и типовых процессов, – это модель идеального проводника с нулевыми значениями емкости и индуктивности. Например, для тонкоплёночного резистора будет задан только номинал его сопротивления без указания его индуктивности или емкости в силу малости последних и незначительного влияния на вольтамперные характеристики (ВАХ) этого резистора. Аналогично для микрополосковых линий не будет указано ни одного из электротехнических параметров. Нельзя не заметить, что для большинства радиоустройств 70-х годов XX века такое приближение было полностью оправдано, а отклонение полученных характеристик, вызванных неидеальностью сформированных элементов, компенсировалась введением подстроечных элементов и непосредственно этапом настройки. Но рост частоты радиоэлементов и стремление к увеличению функциональности устройств уменьшало габариты элементов и повышало плотность рисунка на пластине. Одним

словом, сложность пластин с элементами росла, а ресурсы (временные и материальные) на её разработку и внедрение в серию сокращались по причинам, указанным в начале статьи. Решение было очевидным: отказ от «идеальных приближений» и переход к «реальным» моделям тонкопленочных элементов. Такой переход требовал полного описания «электротехническими» параметрами и добавлением ещё групп – «радиотехнической», «статистической», «контрольно-измерительной» и др.

В PDK элементарный топологический элемент стал описываться гораздо большим числом параметров. Во-первых, аналогично с базовым чертежом все элементы имеют размеры и расстояния. Во-вторых, все элементы имеют «электротехническое описание» для случая постоянного или низкочастотного тока. «Радиотехническое» описание характеризует элемент для ВЧ и СВЧ сигналов, как правило, это набор его S-параметров. «Статистическое» описание учитывает реальный разброс значений элемента при его физической реализации для прогноза при выборе наиболее оптимальных конструкторско-технологических решений. «Контрольно-измерительной» группой можно условно назвать результаты измерения множества физических величии: от геометрии до температурных зависимостей [3]. Очевидно, что чем больше верифицированных на практике параметров описывают тонкоплёночный элемент, тем выше шанс его физической реализации с заданными характеристиками. Такая большая совокупность параметров, конечно, не могла уже быть выражена в рамках чертежа и нуждалась в автоматизации. PDK сегодня представляет собой сложный комплекс, включающий в себя программную часть – библиотеку стандартных элементов, созданную на базе аттестованного (стандартизированного) технологического процесса, сопряженную с САПР и руководство к проектированию. Любое неучтенное изменение в технологическом процессе неизбежно повлечет ошибку в описании стандартного элемента из библиотеки PDK и несоответствие результатов моделирования и изготовления. Учитывая все факторы, в библиотеку стандартных элементов PDK входят не все возможные в данной технологии элементы, а только те, которые обеспечивают нужные характеристики при должной воспроизводимости. Таким образом, конструктор, проектируя в САПР с подключенным PDK, опирается только на технологичные, отработанные на этапе стандартизации технологического процесса стандартизированные элементы. Именно в этом заключается смена приоритетов в модели fables/foundry и главенство технологичности над конструкцией.

Положительным эффектом такого подхода проектирования с первой попытки, исключая этапы макетирования, стала возможность у фабрик продавать свои технологические услуги, при условии, что процесс стандартизирован и имеет актуальный PDK. По факту, на современном мировом рынке электронных компонент перешли от сертификации конструкции к сертификации технологии. В нашей стране, такой переход пока не произошел.

IV. Выводы и заключение

Развитие отечественных технологий производства электронных компонент СВЧ диапазона сдерживает приверженность государства к организационной модели IDM, малоэффективной в современном мире. IDM позиция нашего государства выражается в первую очередь в отсутствии нормативной базы, регламентирующей взаимодействия отечественных дизайн-центров и фабрик-производств в режиме fabless/foundry, а именно продажу фабриками своих технологических услуг по изготовлению, разработанных в дизайн-центрах, компонент, без сертификации или сертификации по упрощенной форме, их конструкции. При таком подходе качество продукции фабрики для дизайн-центра гарантировалось бы не стандартизацией (сертификацией) каждого компонента, которой она изготовила, а стандартизацией технологического процесса, по которому они были произведены. Затраты на сертификацию любого компонента весьма существенны и будут рентабельны для фабрики только при больших объёмах заказа на него, что, очевидно, крайне редко.

Помимо этого, в рамках программы по импортозамещению также реализуется IDM подход. Стремясь создать аналоги некоторым зарубежным микросхемам, государство финансирует проведение разработок отдельно взятых изделий, а не создание отечественных стандартизированных технологий по производству микросхем такого же класса. В России есть дизайн-центры способные удаленно от производства проектировать и размещать свои проекты на фабриках с новыми технологиями, разработанными и стандартизированными при помощи государства, с последующей оплатой заказов по стоимости изготовления. Но нет проектов ни в оборонной, ни в гражданской промышленности с таким объёмом финансирования, чтобы покрыть стоимость создания перспективной технологии, вложенной в цену нескольких десятков или сотен новых микросхем. Такое положение дел в российской электронной промышленности не является чем-то уникальным, а носит общемировой характер уже примерно 30 лет. Зарубежные компании в конце 80-х годов нашли выход и источник дальнейшего развития в концепции fables/foundry.

Список литературы

1. Зверев А. В., Попов В. В., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности // Электроника НТБ. 2011. № 4. С. 107–109.

2. Пушница И. С., Стрельников С. И., Фазылханов О. Р., Филаретов А. Г. Практика разработки и верификации инструментов проектирования (PDK) СВЧ МИС // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ–2018): материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. 17–18 апр. 2018 г. Омск, 2018.

3. Аникин А. В., Дёмин С. В., Столяров А. А. Проблемы разработки и реализации базовых технологических процессов на технологическом комплексе НИИСИ РАН // Труды НИИСИ РАН. 2014. № 1. С. 4–17.

УДК 621.372.54

АКТИВНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В. В. Ерохин, К. В. Мурасов, С. А. Завьялов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной статье описывается активный перестраиваемый полосовой фильтр в интегральном исполнении для использования в качестве сложно-функционального (СФ) блока в технологиях типа система-на-кристалле (СнК) или как полноценное самостоятельное устройство. Фильтр разработан в стандартном технологическом процессе БиКМОП кремний-германий (SiGe) 250 нм. Разработаны схемотехническое и топологическое описание, произведены экспериментальные образцы, разработана и произведена оснастка для дальнейших испытаний экспериментальных образцов. Площадь разработанного топологического описания 0.22 мм^2 (без контактных площадок, которое используется в качестве СФ блока), площадь произведенного экспериментального образца 0.99 мм^2 (с контактными площадками для испытаний и проверки реальных характеристик фильтра). Произведены многочисленные компьютерные моделирования экстракции топологического описания активного полосового фильтра. В результате моделирования было выявлено, что характеристики разработанного фильтра полностью соответствует техническому заданию: коэффициент усиления по напряжению в полосе пропускания не менее 11.93 дБ, коэффициент нелинейных искажений в полосе пропускания не более 5.82 %, верхняя частота среза перестраивается от 0.5 до 3.0 ГГц. Полосовой фильтр сохраняет рабочие характеристики в температурном диапазоне от -40 °С до +85 °С.**

Ключевые слова: кремний-германий, БиКМОП 250 нм, полосовой фильтр, система-на-кристалле, топологическое описание, оснастка.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-120-126

I. Введение

Полосовые фильтры являются неотъемлемой частью любых электронных систем. Полосовые фильтры диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) применяют в различной телекоммуникационной аппаратуре, в том числе в аппаратуре спутниковой и мобильной связи, в технологиях беспроводного доступа в интернет, радиолокации, радионавигации и др.

Бурное развитие микроэлектроники позволило значительно снизить массогабаритные размеры и стоимость беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что в свою очередь способствует повсеместному их использованию. В настоящее время БПЛА используются как в военной сфере для ведения боевых действий, разведки, так и в гражданских сферах для доставки грузов, наблюдения за территориями и объектами, в геодезии для картографии, в сельском хозяйстве для наблюдения и обработки полей. Сферы применений БПЛА и их количество растут в геометрической прогрессии. Согласно оценкам аналитиков Euroconsult, к 2025 году в мире будут использоваться порядка 600 тыс. БПЛА. В условиях большой плотности БПЛА, чтобы летательные аппараты не сталкивались друг другом, с птицами и со строениями они должны быть оснащены передовыми технологиями радиолокации. К таким технологиям предъявляются особенные требования, в частности малое потребление мощности, так как энергоресурс летательных аппаратов сильно ограничен. Решениями проблемы энергопотребления является применение энергоэффективных интегральных приемопередатчиков или применение интегральных пассивных радаров. Пассивные радары не излучают сигнала, а только принимают сигнал испускаемый объектом или отраженный от объекта. При отсутствии передатчика дрон сложнее обнаружить, что непременно может быть полезно для использования в военной сфере. Основной регион применения БПЛА с пассивным радаром это городская местность, в которой СВЧ диапазон заполнен сигналами различных бытовых устройств: радио, сигнализация, мобильная связь, Wi-Fi и другие. В любом из перечисленных случаев система радиолокации БПЛА требует наличия полосового фильтра СВЧ диапазона.

II. Постановка задачи

Задачей данной работы является разработка активного перестраиваемого полосового фильтра, применяемого в качестве СФ блока для сверхширокополосного супергетеродинного приемника дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Основные технические требования для разработки фильтра сведены в табл. 1. Кроме параметров, занесенных в табл. 1, для экспериментального образца фильтра необходимо обеспечить согласование по входу и выходу с нагрузкой и источником сигнала 50 Ом.

ТАБЛИЦА 1
ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ФИЛЬТРУ

Параметр	**Значение**
Технологический процесс	SiGe БиКМОП 250 нм
Напряжение питания, В	2.5±10%
Нижняя частота среза (F1), ГГц	0.1±5%
Верхняя частота среза (F2), ГГц	Перестраивается от 0.5 до 3.0 ±5%
Амплитуда входного дифференциального сигнала, мВ	8±2
Коэффициент усиления по напряжению, дБ	Не менее 10
Коэффициент нелинейных искажений в полосе пропускания, %	Не более 7
Диапазон рабочих температаур, °С	-40…+85

III. Принципиальная схема и топологическое описание фильтра

На рис. 1 представлена блок-схема разработанного активного перестраиваемого фильтра. Фильтр является полностью дифференциальным и состоит из дифференциальных усилителей (ДУ) и программно-конфигурируемых фильтров нижних частот (ФНЧ). ФНЧ программируются двоичным кодом, состоящим из 5 бит (EN_0 – EN_4). При изменении управляющего кода, изменяется верхняя частота среза полосового фильтра. При подаче логического «0» на все управляющие входы (EN_0 – EN_4), верхняя частота среза фильтра будет равна 3.0 ГГц. При подаче логической «1» на все управляющие входы, верхняя частота среза фильтра будет равна 0.5 ГГц. При перестроении верхней частоты среза, нижняя частота среза остается неизменной и составляет 0.1 ГГц.

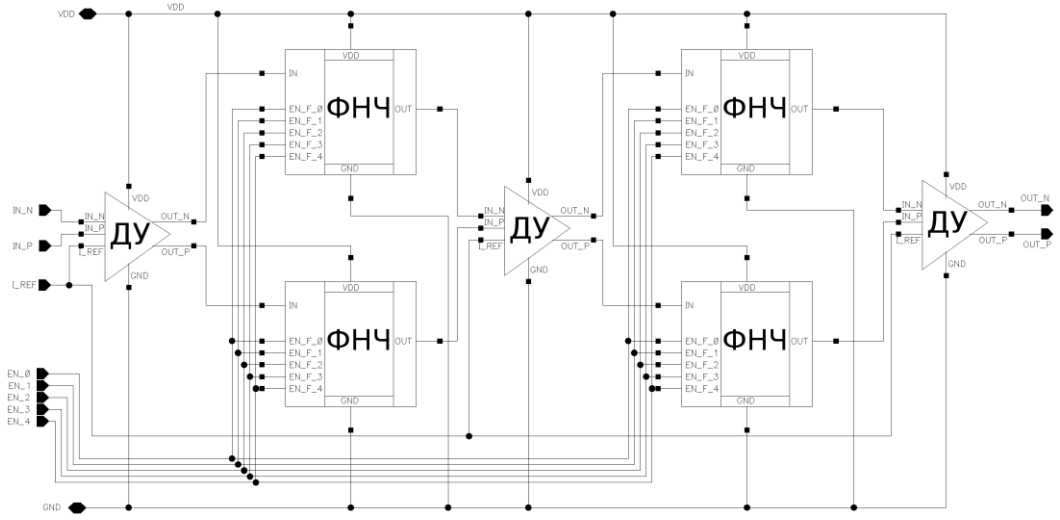


Рис. 1. Блок-схема активного перестраиваемого полосового фильтра

На рис. 2 представлена принципиальная схема дифференциального усилителя [1–5]. ДУ состоит из дифференциального каскада, основанного на транзисторах VT2, VT4. Транзисторы VT1, VT3, VT5 являются токовым зеркалом, которое задает ток, проходящий через дифференциальную пару транзисторов. На вход I_REF подается стандартный опорный ток 130 мкА [6–8]. Резисторы R1, R5 задают ток БЭ транзисторов VT2, VT4, то есть задают их рабочие точки. Резисторы R2, R4 ограничивают максимальный ток потребления дифференци-

альной пары и задают коэффициент усиления по напряжению каскада. Конденсаторы C1, C2 являются разделительными, но также выполняют функцию фильтров верхних частот (ФВЧ), образуя RC – фильтры с последовательно включенным входным сопротивлением дифференциального каскада [1, 2] . RC – цепочка R3, C3 выполняет функцию обратной связи по току. Введение обратной связи позволяет значительно повысить стабильность всего фильтра, уменьшить нелинейные искажения, увеличить динамический диапазон при этом коэффициент усиления по напряжению уменьшается.

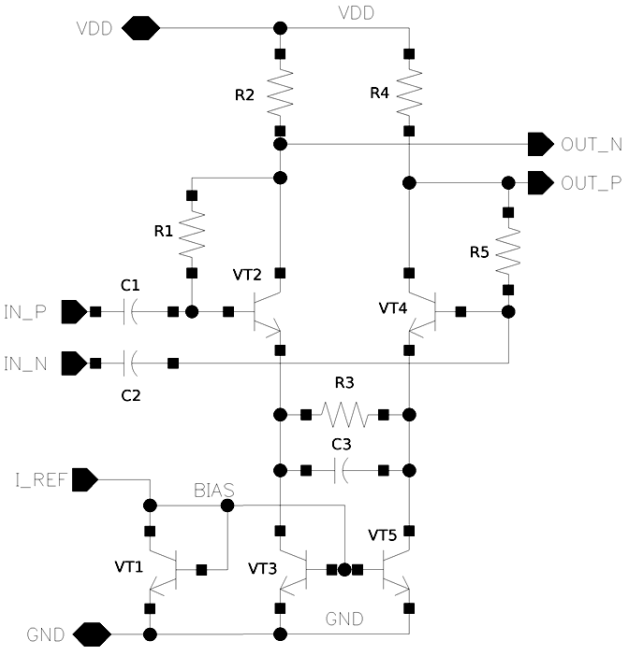


Рис. 2. Принципиальная схема ДУ

Принципиальная схема фильтра нижних частот представлена на рис. 3 [1–5]. ФНЧ состоит из транзистора VT6, включенного по схеме общий коллектор (ОК), сопротивления и емкости эмиттера (транзистора VT6) R2 и C7 соответственно, перестраиваемого RC – фильтра состоящего из резистора R1, конденсаторов C1 – C6, транзисторов VT1 – VT5, выполняющих функцию ключей. Конденсатор C1 ограничивает максимум верхней частоты среза фильтра (3.0 ГГц). При открытых ключах VT1 – VT5 ширина полосы пропускания фильтра будет минимальна (0.1 – 0.5 ГГц), при закрытых ключах – будет максимальна (0.1 – 3.0 ГГц).

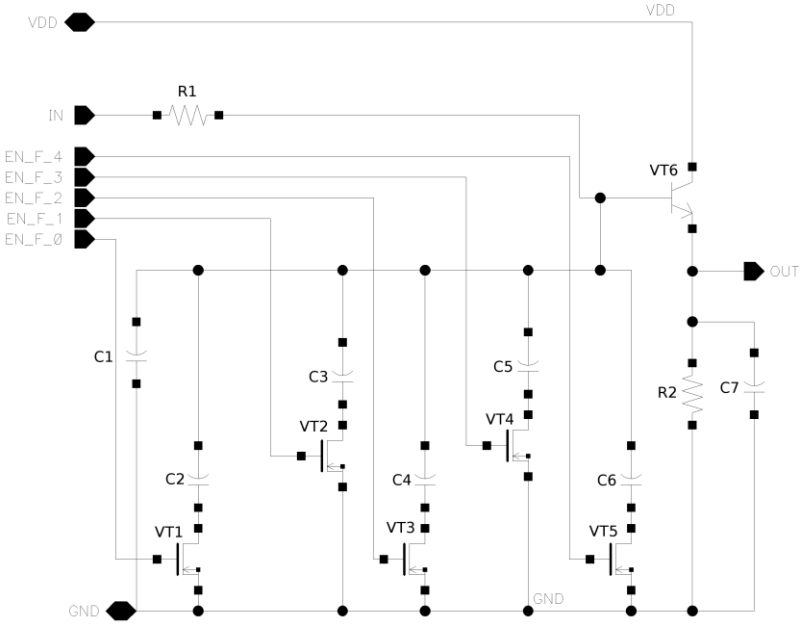


Рис. 3. Принципиальная схема ФНЧ

Разработано топологическое описание активного полосового фильтра, представленное на рис. 4. Топологическое описание разработано с учетом топологических норм проектирования технологического процесса кремний-германий БиКМОП 250 нм, а также с учетом согласования полностью дифференциальных схем [9–11]. Размеры топологического описания: ширина 345 мкм, длина 634 мкм. Данное топологическое описание можно использовать в качестве сложно-функционального (СФ) блока в супергетеродинном приемнике и других устройствах, выполняемых в технологическом процессе SiGe БиКМОП 250 нм.

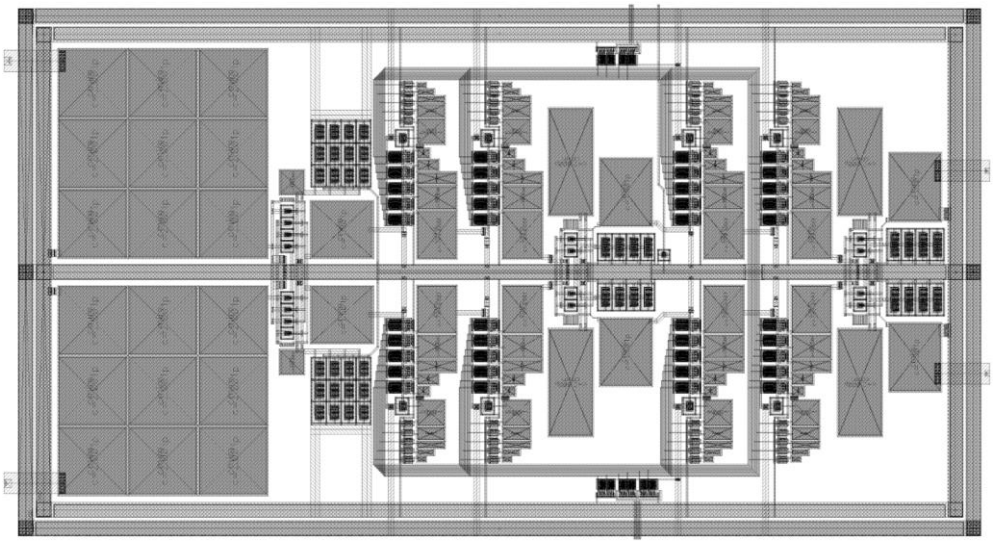


Рис. 4. Топологическое описание разработанного фильтра

Для возможности проведения компьютерного моделирования топологического описания была произведена операция экстракции, то есть формирование схемотехнического описания с учетом всех паразитных сопротивлений, емкостей, индуктивностей, которые неизбежно появляются в процессе разработки топологического описания. Компьютерное моделирование экстракции топологического описания позволит получить характеристики более близкие к реальным, чем при моделировании принципиальной схемы.

VI. Результаты компьютерного моделирования

Чтобы убедиться в работоспособности и соответствии техническим требованиям разработанного активного перестраиваемого полосового фильтра, произведены многочисленные компьютерные моделирования экстракции топологического описания в программном обеспечении Cadence.

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования в виде амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) активного полосового фильтра при перестроении верхней частоты среза. Пунктирной линией изображена АЧХ фильтра при верхней частоте среза 3.0 ГГц (при подаче логического «0» на все управляющие входы), сплошной линией при 0.5 ГГц (при подаче логической «1» на все управляющие входы).

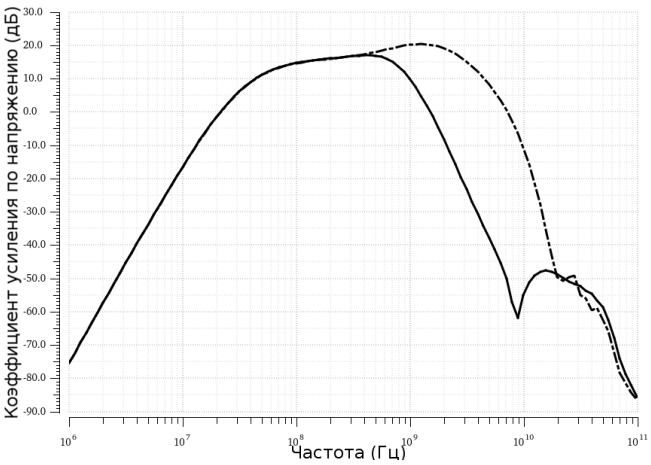


Рис. 5. АЧХ активного полосового перестраиваемого фильтра

Чтобы убедиться в работоспособности фильтра в диапазоне температур -40°С...+85°С произведены параметрические анализы, результаты которых занесены в таблицы 2 и 3. В таблицу 2 занесены результаты компьютерных моделирований экстракции топологического описания в виде зависимости коэффициента нелинейных искажений от частоты при различных частотах входного сигнала (с амплитудой 10 мВ) и при разных конфигурациях верхней частоты среза. В таблице 2 символ «–» означает, что частота входного сигнала находится вне полосы пропускания фильтра. В таблицу 3 занесены результаты моделирований в виде зависимости коэффициента усиления по напряжению от частоты входного сигнала при различных температурах и при верхней частоте среза фильтра 0.5 ГГц.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

Температура, °С	**Частота, МГц**	**Коэффициент нелинейных искажений, %**		
		При верхней частоте среза 3.0 ГГц	**При верхней частоте среза 1.5 ГГц**	**При верхней частоте среза 0.5 ГГц**
-40	100	0.64	0.64	0.71
	500	1.46	1.70	2.83
	1000	3.04	5.36	1.39
	1500	4.64	5.73	-
	2000	5.22	5.82	-
	2500	4.17	-	-
	3000	2.84	-	-
+27	100	0.36	0.37	0.44
	500	0.92	1.02	1.21
	1000	1.70	2.31	0.50
	1500	2.10	3.14	-
	2000	2.01	2.04	-
	2500	1.61	-	-
	3000	1.12	-	-
+85	100	0.39	0.39	0.45
	500	0.82	0.90	0.89
	1000	1.11	1.43	0.32
	1500	1.07	1.32	-
	2000	0.85	0.82	-
	2500	0.65	-	-
	3000	0.50	-	-

ТАБЛИЦА 3
РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

Температура, °С	**Частота, МГц**	**Коэффициент усиления по напряжению, дБ**
-40	100	16.25
	200	18.67
	300	19.22
	400	19.03
	500	16.41
+27	100	15.65
	200	17.72
	300	18.83
	400	18.55
	500	15.77
+85	100	11.93
	200	14.35
	300	14.97
	400	14.76
	500	12.08

VII. Обсуждение результатов

На рис. 5 видно, что верхняя частота среза полосового фильтра может перестраиваться от 0.5 ГГц до 3.0 ГГц, что соответствует техническому заданию.

По результатам компьютерных моделирований экстракции топологического описания, занесенным в таблицу 2, видно, что коэффициент нелинейных искажений при различных частотах входного сигнала, различных температурах окружающей среды и различных комбинаций кода на управляющих входах не превышает 5.82 %, что на 1,18 % меньше максимально допустимого значения.

По результатам, занесенным в таблицу 3 видно, что коэффициент усиления по напряжению при различных температурах, в полосе пропускания не опускается ниже 11.93 дБ, что на 1,93 дБ больше необходимого значения, заданного техническим требованиями к фильтру.

IV. Экспериментальные образцы и оснастка

По разработанной топологии активного перестраиваемого полосового фильтра были произведены экспериментальные образцы для проверки работоспособности схемы, проверки на соответствие техническим требованиям, исследования технологического разброса. На рис. 6 представлена микрофотография произведенного экспериментального образца. Размеры экспериментального образца: ширина 1.1 мм, длинна 0.9 мм, занимаемая площадь на кристалле 0.99 мм^2.

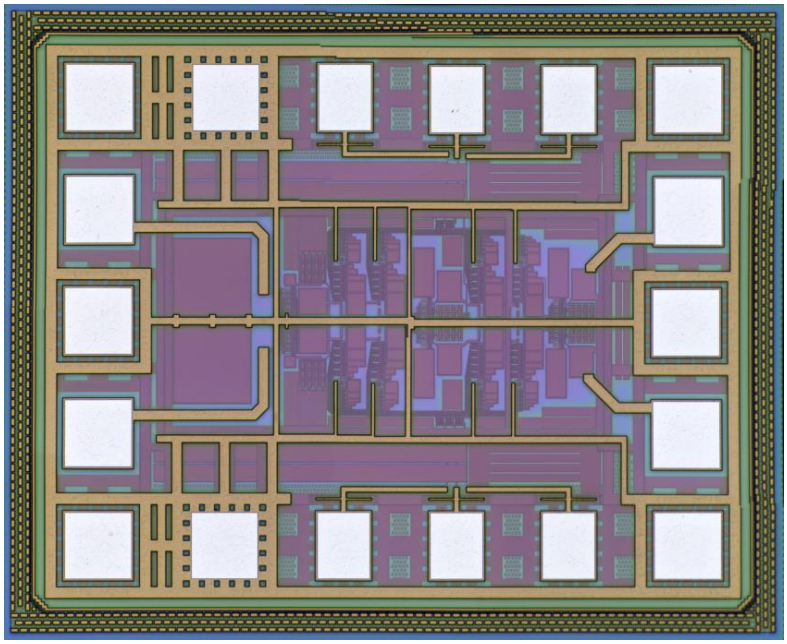


Рис. 6. Микрофотография экспериментального образца фильтра

Для испытаний экспериментальных образцов разработана и произведена плата оснастки, фотография которой изображена на рис. 7. Размеры оснастки: длинна 47 мм, ширина 47 мм. На оснастке предусмотрены технологические отверстия для крепления платы к жесткой основе. На плате размещены 6 цифровых выводов и 4 копланарные 50-омные линии передач находящиеся под углом 90°. На цифровые выводы подаются управляющие сигналы EN_0 – EN_4 и подключается источник тока 130 мкА. Копланарные 50-омные линии подключаются к высокочастотным дифференциальным входам и выходам фильтра IN_N, IN_P и OUT_N, OUT_P соответственно. К концам 50-омных линий подключаются высокочастотные SMA разъемы. Остальное место на плате занимает контакт земли (GND). На плате размещены многочисленные металлизированные отверстия для улучшения высокочастотных свойств земляных полигонов. Контакты источника питания (VDD) подключаются через конденсаторы К10-71, второй вывод которых подключается к контакту земли.

Разработан активный перестраиваемый полосовой фильтр в технологическом процессе кремний-германий БиКМОП 250 нм. Разработана принципиальная схема и топологическое описание, произведены экспериментальные образцы и оснастка для испытаний образцов. Размеры экспериментального образца: длина 1.1 мм, ширина 0.9 мм, занимаемая площадь 0.99 мм^2. Размеры топологического описания, которое можно использовать в качестве СФ блока в сверхширокополосном супергетеродинном приемнике дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн: ширина 345 мкм, длина 634 мкм, занимаемая площадь 0.22 мм^2.

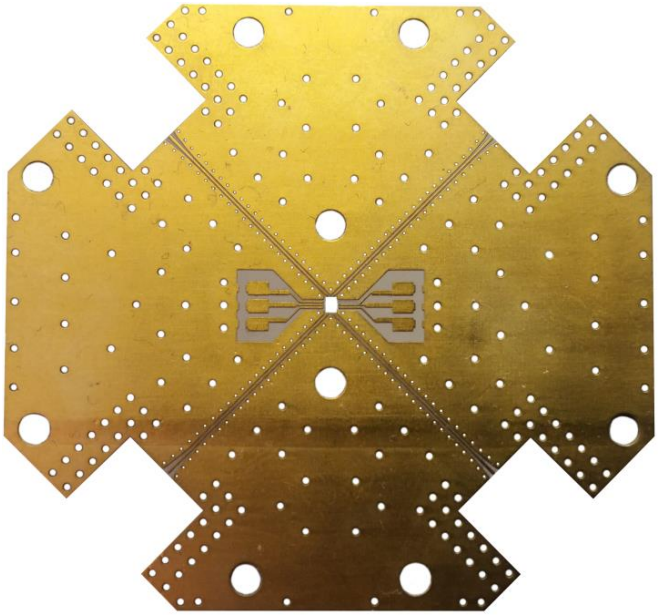


Рис. 7. Фотография платы оснастки для испытаний экспериментального образца фильтра

VIII. Выводы и заключение

Коэффициент нелинейных искажений при максимальной амплитуде входного сигнала (10 мВ), при различных температурах, частотах входного сигнала и конфигурациях управляющих кодов не превышает 5.82 %. Это на 1.18 % меньше максимально допустимого значения.

Коэффициент усиления по напряжению фильтра в наихудших условиях не опускается ниже 11.93 дБ, что больше необходимого значения на 1.93 дБ.

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках ФЦП (Федерального целевого проекта) «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ. Уникальный идентификатор работ RFMEFI57417X0164.

Список литературы

1. Эннс В. И., Кобзев Ю. М. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем / под ред. Эннса В.И.: М.: Горячая линия – телеком, 2005. 454 с.

2. Баринов В. В., Круглов Ю. В., Тимошенко А. Г. Телекоммуникационные системы на кристалле. Часть 1 / под ред. Баринова В. В. М. : МИЭТ, 2007. 45 с.

3. Ron Mancini. Op Amps For Everyone // Texas Instruments. 2002. 464 p.

4. Johns D., Martin K. Analog Integrated Circuits Design / Wiley Text Books. 1997.

5. Agarwal Anant, Lang Jefferey H. Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits / Elsevier Inc., 2005. 1009 p.

6. Rodion R. Fakhrutdinov, Sergey A. Zavyalov, Konstantin V. Murasov, Denis A. Koemec. Current Source and Voltage Reference for Broadband Receiver in BiCMOS 130 nm / 14th International Scientific-Technical Conference APEIE, Novisibirsk, October 2–6 2018. Vol. 1, part 3. P. 28–32.

7. Keith Sanborn [et al.]. A Sub-1-V Low-Noise Bandgap Voltage Reference / IEEE J. Solid-State Circuits, Novenber 2007. Vol. 42, no. 11. P. 2466–2481.

8. Sun Na, Sobot Robert. A Low-Power Low-Voltage Bandgap Reference in CMOS / Electrical and Computer Engineering (CCECE), 23rd Canadian Conference on. IEEE, 2010.

9. Williams Jim. Analog Circuit Design: Art, Science and Personalities / Butterworth-Heineman (USA), 1998. 415 p.

10. Alan Hastings. The art of alanlog layout / Prentice hall 2001. 539 p.

11. Clein Dan, Simokura Gregg. CMOS IC Layout: Concepts, Methodologies, and Tools // Elsevier Inc., 2000. 288 p.

УДК 621.382.2.3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕЙ ЦЕЛОЧИСЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ФАПЧ

С. А. Завьялов, В. Ю. Шеин, Р. Р. Фахрутдинов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье рассматриваются проблемы проектирования высокоточной системы формирования опорных импульсов на основе ФАПЧ. Проанализированы современные методики улучшения фазового шума. Предложена улучшенная архитектура синтезатора, которая способна обеспечить выходной сигнал в диапазоне 1 ГГц - 1.4 ГГц при низком уровне фазового шума. Предложена оптимальная структура генератора управляемого напряжением, схемы накачки заряда и делителя частот. Проведены расчеты качественных показателей синтезатора частот, а так же произведено моделирование фазового шума.**

Ключевые слова: ФАПЧ, ГУН, многомодульный делитель, накачка заряда, минимизация фазового шума, FOM.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-127-133

I. Введение

В статье рассматривается целочисленная система ФАПЧ, которая перекрывает диапазон частот 1 ГГц – 1.4 ГГц с шагом 50 кГц. Устройство может использоваться в составе систем передачи данных любого назначения, таких как радионавигационные системы гражданской авиации, беспроводные датчики в системах умного дома и т.д.

Проектирование системы ФАПЧ является весьма сложной задачей с большим количеством компромиссов. Например, увеличение диапазона рабочих частот приводит к повышению фазового шума ГУН, усложнению конструкции петлевого фильтра, делителя частоты. Введение коррекции тока заряда петлевого фильтра приводит к увеличению потребляемой мощности, увеличению занимаемой площади. Увеличение занимаемой площади приводит к тому, что согласование интегральных компонентов схемы осложняется, а так же увеличиваются перекрестные помехи и наводки между компонентами схемы. Поэтому подход к решению возникающих проблем проектирования должен быть комплексный. Применение специальных схемотехнических решений позволило снизить влияние составных блоков синтезатора частот на суммарный фазовый шум схемы. Малый шаг перестройки и относительно низкая выходная частота синтезатора приводит к тому, что петлевой фильтр невозможно исполнить в составе интегральной микросхемы, ввиду больших номиналов конденсаторов, поэтому конденсаторы фильтра применяются в виде дискретных элементов.

Альтернативой целочисленной ФАПЧ может служить синтезатор с дробным коэффициентом деления, который позволяет уменьшить коэффициент деления и габариты петлевого фильтра, увеличить частоту сравнения, что в свою очередь повышает скорость выхода на рабочий режим. Однако принцип реализации дробного деления вносит дополнительный фазовый шум в схему, и конечный результат может не удовлетворять предъявленным требованиям.

Генерирование спектрально чистых опорных колебаний приводит к увеличению энергоэффективности приемо-передающей аппаратуры, повышению качества и дальности связи, а так же к минимизации габаритов конечной системы. В связи с этим совершенствование основных комплектующих радиопередающих устройств является актуальной задачей.

II. Постановка задачи

Целью данной работы является проектирование малошумящей системы ФАПЧ, предназначенной для работы в современных системах связи. В статье рассмотрены способы построения основных узлов, проблемы, возникающие при проектировании, а так же современные схемотехнические решения, позволяющие улучшить параметры составных блоков и всей системы в целом.

Рабочий диапазон разрабатываемого синтезатора частот находится в интервале от 1 ГГц до 1.4 ГГц с шагом перестройки 50 кГц. Устройство проектировалось в технологическом базисе КМОП 65нм. Напряжение питания составляет 1.2 В.

III. Теория

На рис. 1 представлена блок-схема синтезатора частот на основе ФАПЧ с целочисленной архитектурой. Синтезатор состоит из фазочастотного детектора (ФЧД), схемы накачки заряда (СНЗ), петлевого фильтра, генератора управляемого напряжением (ГУН) и делителя эталонной и синтезируемой частот.

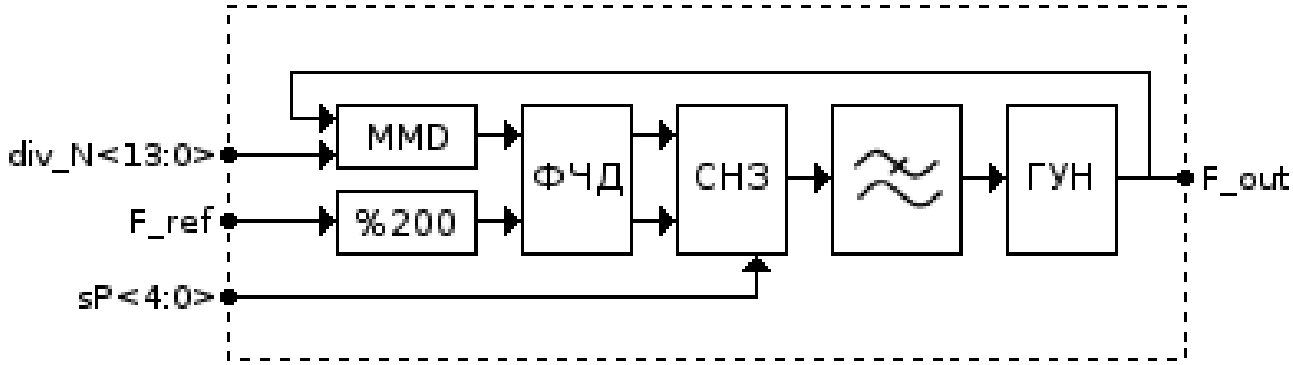


Рис. 1. Блок-схема синтезатора частот на основе ФАПЧ

Рассмотрим основной принцип синтеза частот на основе системы ФАПЧ. Подстройка выходной частоты петли ФАПЧ производится фазочастотным детектором, который производит сравнение эталонной частоты, поделенной на 200, с выходной частотой ГУН, поделенной на коэффициент N. Полученная фазовая ошибка подается в виде дискретных импульсов, на схему накачки заряда, которая, в свою очередь увеличивает или уменьшает заряд на конденсаторах петлевого фильтра, тем самым, регулируя значение управляющего напряжения ГУН. Ширина корректирующих импульсов соответствует величине фазовой ошибки двух сравниваемых сигналов. Дискретный характер подстройки управляющего напряжения генератора вносит пульсации в выходной сигнал синтезатора. Эти пульсации подавляются петлевым фильтром, который по своей структуре является фильтром низких частот. Величина остаточных пульсаций, получаемая на выходе фильтра пропорциональна ширине полосы пропускания петлевого фильтра. Слишком большая амплитуда пульсаций, подаваемая на управляющий вход ГУН, может привести к перегрузке и разрыву петли синхронизации ФАПЧ. Выходная частота синтезатора определяется выражением (1).

$$f_{out} = \frac{f_{ref}.N}{P} \tag{1}$$

Большое значение коэффициента деления (N) приводит к расширению сетки генерируемых частот, но при этом замедляет реакцию на любые изменения на входе ФЧД, увеличивает время установления рабочего режима и уровень фазовых шумов. Уровень фазовых шумов описывается выражением (2), где λ_{PD}- уровень шума ФЧД.

$$\lambda = \lambda_{PD} + 20\log N \tag{2}$$

Шумовые характеристики петли ФАПЧ в наибольшей степени зависят от характеристик ГУН. Существует большое количество схем построения управляемых генераторов, из которых можно выделить две основные группы: кольцевые генераторы на основе инверторов, охваченных положительной обратной связью, и LC генераторы с отрицательным сопротивлением.

Кольцевые генераторы обладают широким диапазоном перестройки более 300%, но уровень фазовых шумов таких генераторов высок, поэтому такая структура не подходит для высокоточных систем и рассматриваться не будет. Генераторы на LC элементах имеют низкий фазовый шум, а диапазон перестройки обычно не превышает 20%. Доступно множество вариаций построения цепей обеспечивающих отрицательное сопротивление для компенсации потерь в колебательном контуре. Оптимальная структура построения LC ГУН по технологии КМОП, обеспечивающая низкий уровень фазовых шумов, показана на рис. 2

Использование комплементарных NMOS и PMOS транзисторов позволяет снизить энергопотребление и увеличить амплитуду генерируемого сигнала до уровня питающего напряжения. Исключение источников тока из питающих цепей позволяет убрать дополнительно вносимый шум в генератор. Фильтрация шума от источника тока рассмотрена во многих работах [1, 2, 3], однако ГУН, реализованный без источников тока, показывает наилучшие результаты.

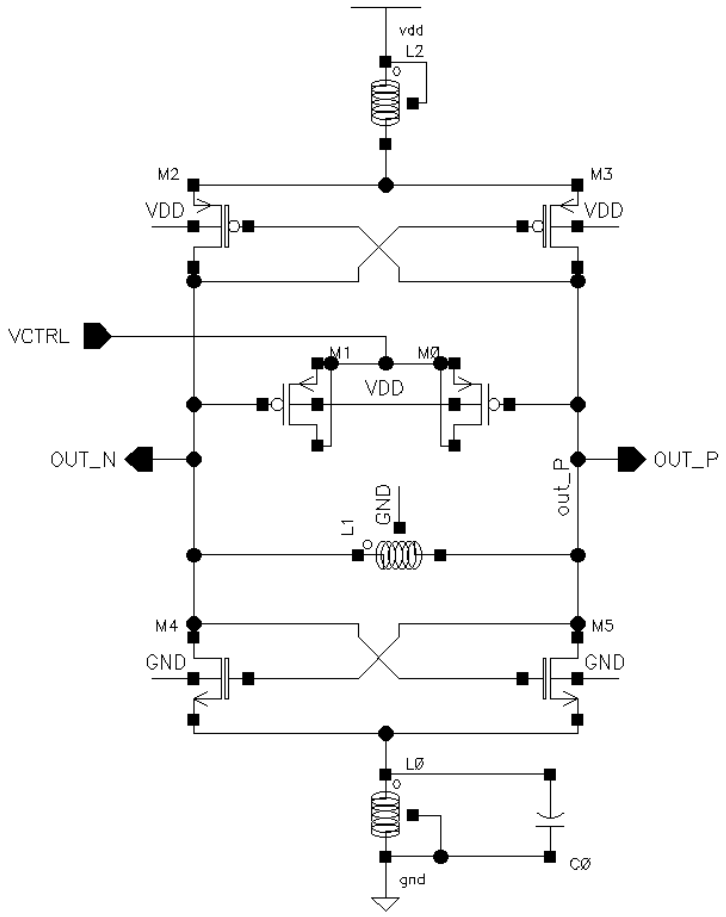


Рис. 2. Структура построения LC ГУН

Добавление фильтрующих катушек в цепи питания позволяет снизить чувствительность схемы к шуму по линиям питания и уменьшить фазовый шум более чем на 15 дБн/Гц. Измерение фазового шума ГУН на частоте 1.2 ГГц показано на рис. 3. Величина фазового шума ГУН с фильтрующими катушками при отстройке на 10 кГц равна -87.14 дБн/Гц, а величина фазового шума ГУН без катушек равна -72.69 дБн/Гц.

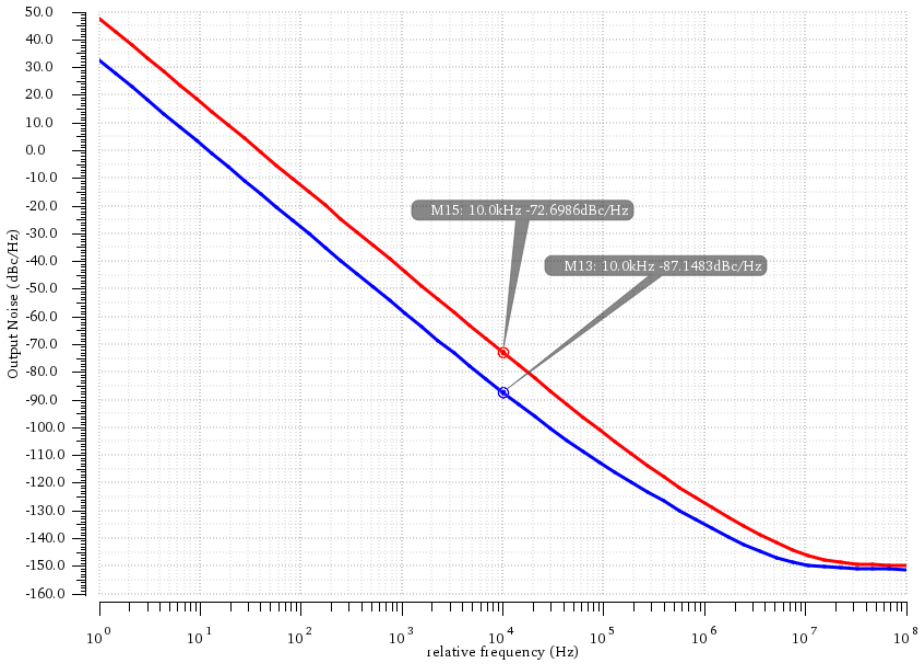


Рис. 3. Измерение фазового шума ГУН на частоте 1.2 ГГц

Учитывая рабочий диапазон частот и требуемый шаг перестройки системы ФАПЧ, частота сравнения выбрана равной 50 кГц, поэтому при использовании опорного кварцевого генератора с рабочей частотой 10 МГц коэффициент деления P будет равен 200. Согласно выражению 1, коэффициент деления N делителя выходной частоты ГУН принимает целочисленные значения от 20000 до 28000.

Создание перестраиваемого делителя на основе типовых делителей на 2, 3, 5, 7 и т.д. осложняется огромным количеством логических элементов, синхронизация работы которых, затруднительна из-за наличия большого количества паразитных емкостей и индуктивностей. При этом получить все необходимые значения деления невозможно ввиду ограниченного набора значений делителей.

В современных системах ФАПЧ применяется наиболее совершенная архитектура программируемого многомодульного делителя (MMD), которая показана на рис. 4

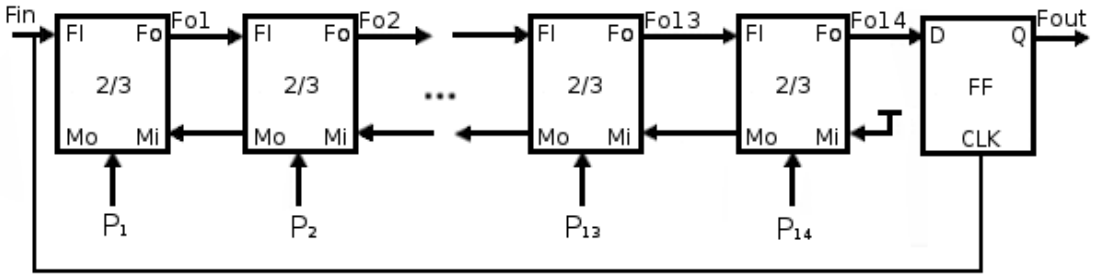


Рис. 4. Архитектура программируемого многомодульного делителя (MMD)

Данная архитектура позволяет обеспечить деление с единичным шагом, упростить логику управления коэффициентами деления, уменьшить площадь и потребляемую мощность при незначительном уменьшении рабочей частоты. Увеличение коэффициента деления происходит путем наращивания количества каскадов деления. Диапазон перестройки делителя определяется выражением (3).

$$div_ratio = 2^{N} ... 2^{N+1} - 1 \quad (3)$$

Программируемый MMD делитель состоит из 14 одинаковых перестраиваемых каскадов деления на 2 или 3, а так же блока пересинхронизации. Каждый каскад способен работать с входным сигналом с частотой до 7.3 ГГц. Принципиальная схема ячейки деления на 2/3 показана на рис. 5

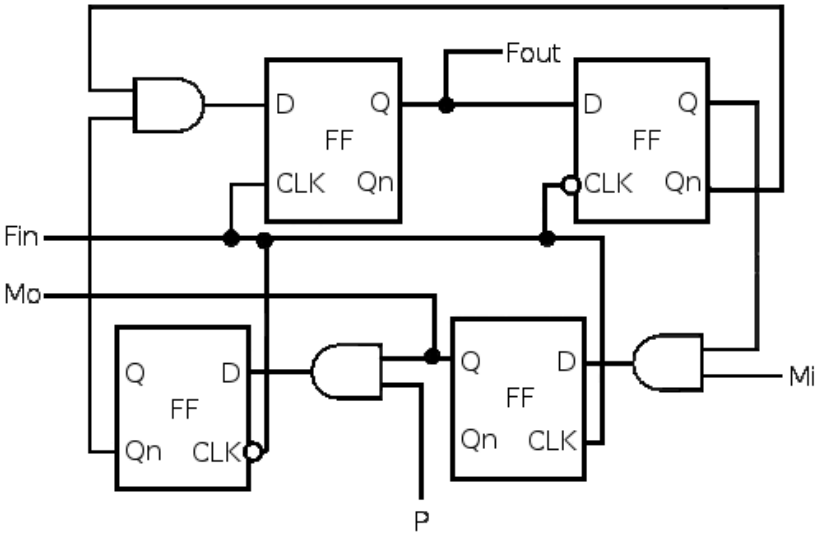


Рис. 5. Принципиальная схема ячейки деления на 2/3

Ячейка деления состоит из основного и дополнительного делителя, реализованных с помощью триггера, а так же вспомогательных синхронизирующих триггеров согласующих сигналы Mi, Mo между каскадами деления. При подаче управляющего сигнала на вход P, дополнительный делитель удерживает фронт входного сигнала, что увеличивает коэффициент деления до 3. Последующие каскады деления работают аналогичным обра-

зом, но на меньшей частоте. Поэтому весовой коэффициент подстройки деления увеличивается как 2^N с каждым последующим каскадом.

Асинхронная реализация делителя имеет тенденцию накапливать фазовое дрожание выходного сигнала на каждом каскаде деления. Компенсация дрожания фазы практически полностью устраняется цепью пересинхронизации с помощью триггера, тактируемого более стабильным тактовым сигналом. Остаточное дрожание фазы определяется стабильностью опорного сигнала и скоростью переключения триггера. Кроме того, амплитуда колебания частоты петли ФАПЧ уменьшается, в результате чего, синтезируемая частота устанавливается быстрее. Переходный процесс установления рабочей частоты петли ФАПЧ с пересинхронизацией показано на рис. 6

Схема накачки заряда это трех позиционный электронный переключатель, который управляется тремя состояниями фазочастотного детектора. Основной задачей схемы накачки заряда является генерирование постоянного выходного тока не зависимо от дестабилизирующих факторов. В идеальном состоянии при отсутствии фазовой ошибки и тока утечки ключи схемы накачки заряда закрыты, таким образом петлевой фильтр изолируется от схемы коррекции управляющего напряжения. В реальной схеме присутствуют утечки тока в подложку, паразитная модуляция управляющего напряжения выходным сигналом ГУН, которые вызывают ложные срабатывания ФЧД. Не зависимо от качества проектирования петлевого фильтра, корректирующие импульсы вносят пульсации в управляющий сигнал, нестабильность которого увеличивает шум на выходе ГУН. В работах [4, 5, 6] рассмотрены реализации схем накачки заряда с подавлением пульсаций коммутационных цепей и уменьшением рассогласования протекаемого тока. Улучшенная схема накачки заряда показана на рис. 7.

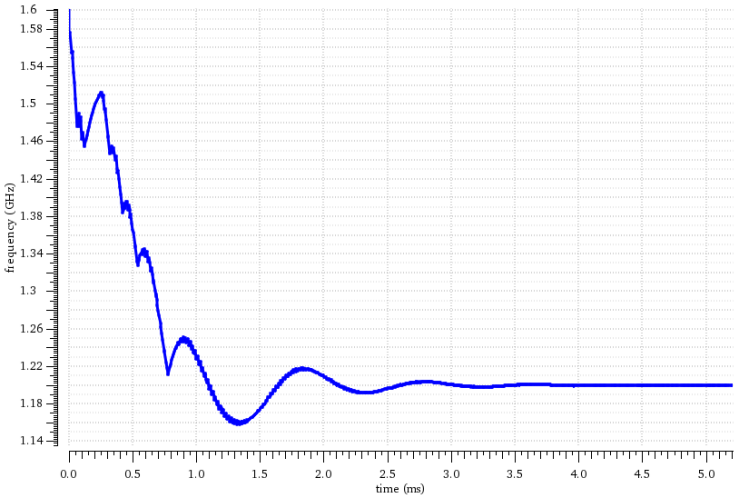


Рис. 6. Установление рабочей частоты петли ФАПЧ

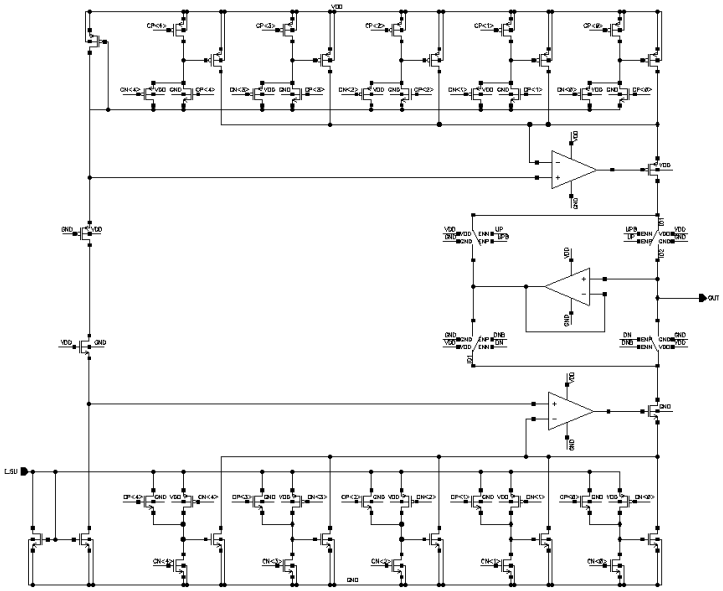


Рис. 7. Улучшенная схема накачки заряда

Данная схема универсальна и способна обеспечить высокостабильный ток заряда от 5мА до 155мА. Выбор тока заряда зависит от рабочего режима и времени установления системы. Уменьшение тока заряда приводит к увеличению влияния токов утечки на результирующий ток схемы. Увеличение тока заряда приводит к увеличению помехоустойчивости, но при этом номиналы емкостей петлевого фильтра увеличиваются пропорционально току заряда.

Нестабильность напряжения на петлевом фильтре возникает из-за разности втекаемого и вытекаемого токов через схему накачки заряда. Наиболее простым методом согласования тока заряда и разряда является уравнивание сопротивления источников тока путем подгонки крутизны транзисторов по ВАХ, однако для качественной работы этого недостаточно, так как технологический разброс при изготовлении электронных компонентов приводит к рассогласованию тока. Неоднородность протекаемого тока устраняется путем введения двух дополнительных операционных усилителей в цепь накачки заряда. ОУ управляют КМОП транзисторами, включенными в цепь ООС, увеличивая или уменьшая сопротивление, в зависимости от протекаемого через транзисторы тока. Другая особенность включения ОУ в схему накачки заключается в том, что опорное напряжение подается на неинвертированный вход ОУ с цепи опорного источника тока. Это позволяет поддерживать протекаемый ток на одном уровне при этом уменьшить коэффициент пульсаций и повысить стабильность, ввиду наличия ООС. Третий операционный усилитель, включенный в режиме повторителя напряжения, уравнивает потенциал на параллельной ветви протекания тока пропорционально потенциалу на петлевом фильтре, что гарантирует однородность протекаемого тока через ветви, независимо от рабочего режима.

Качественно оценить работу петли ФАПЧ можно не только по уровню фазового шума, но и по эталонному показателю качества (FOM_{pll}),с помощью выражения (4), где σ_t – среднеквадратическая кратковременная нестабильность частоты ФАПЧ ($КНЧ_{RMS}$), P_{pll} – потребляемая мощность ФАПЧ [7]. Показатель (FOM_{pll}) используется для оценки нестабильности ФАПЧ в зависимости от потребляемой мощности. Он так же полезен для сравнения синтезаторов предназначенных для различных приложений. Чем ниже значение FOM, тем лучше устройство.

$$FOM_{pll} = 10\log\left[\left(\frac{\sigma_{t,\,pll}}{1s}\right)^2 \cdot \left(\frac{P_{pll}}{1mW}\right)\right] \tag{4}$$

IV. Результаты моделирования

На основе результатов моделирования были получены основные параметры целочисленного ФАПЧ синтезатора, по которым можно объективно оценить качество и сферу применения интегральной схемы. Разработанный синтезатор обладает низким уровнем фазового шума и способен перестраивать выходную частоту от 1 ГГц до 1.4 ГГц в рабочем диапазоне. Флуктуации синтезируемой частоты не превышают 1.15 кГц от пика до пика. Время выхода на рабочий режим составляет 4 мс. Среднеквадратическая кратковременная нестабильность частоты составляет 736 фс. Потребляемая мощность не превышает 10.2 мВт. Полученные результаты исследования сведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

	Данная работа	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]
Тех.процесс	65 нм	65 нм	65 нм	65 нм	40 нм	14 нм
Напряжение пинания	1.2 В	1.2 В	1.2 В	1.2 В	1.1 В	0.95 В
Выходная частота	1.2 ГГц	6.25 ГГц	10 ГГц	5 ГГц	5 ГГц	4 ГГц
Частота сравнения	50 кГц	312.5 МГц	625 МГц	156.25 МГц	250 МГц	100 МГц
Потребляемая мощность	10.2 мВт	3.1 мВт	7.6 мВт	15.4 мВт	3.34 мВт	2.56 мВт
FOM	-232.5 дБ	-237.2 дБ	-238.8 дБ	-234.4 дБ	-232.9 дБ	-233.9 дБ
$КНЧ_{RMS}$	736 фс	780 фс	414 фс	484 фс	1242 фс	1264 фс

V. Выводы и заключение

В статье были проанализированы наиболее важные узлы синтезатора частот на основе ФАПЧ, вносящие наибольший вклад в результирующее значение фазового шума. Предложена архитектура ГУН с низким уровнем фазовых шумов, многомодульный делитель частот, перестраиваемая схема накачки заряда с встроенной коррекцией протекаемого тока. Диапазон перестройки синтезатора равен 40%. Показатель качества системы ФАПЧ равен -232.5 дБ, что является хорошим показателем, учитывая низкую частоту сравнения. Увеличенное энергопотребление связано с наличием трех корректирующих ОУ в схеме накачки заряда. Данный синтезатор частот предназначен для внедрения в современные высокостабильные, мобильные и энергоэффективные системы связи, проектируемые на основе интегральных технологий.

Список литературы

1. Tiebout M. Low power VCO design in CMOS // Springer, 2006. 126 p.
2. Wang D., Zhang. K., Zou X. Wideband Q-VCO using tail current shaping based automatic amplitude control // Microelectronics journal. 2012. 367 p.
3. Jafari B., Sheikhaei S. Low phase noise LC VCO with sinusoidal tail current shaping using cascade current source // International journal of electronics and communications. Vol. 83. 114 p.
4. Ghaderi N., Denghani A. A novel high swing, low power charge pump circuit with excellent current matching // Iranian conference on electrical engeneering. 2016.
5. Xu Z., Jian H., Chang F. A 70–78-GHz integrated CMOS frequency synthesizer for W-Band satellite communications. Microwave theory and techniques.2011. Vol. 59., no2.
6. Razavi B. Design of Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits-A Tutorial.
7. Gao X., Klumperink A.M. Jitter analysis and a benchmarking figure of merit for phase locked loops. IEEE transactions on circuits and systems.2009. Vol.56, no.2.
8. Zhang Z., et al. 1.25-to-6.25 GHz -237.2-dB FOM wideband self-biased PLL for multi-rate serial link data transmitter. IEICE electronics express.Vol.41
9. W. Bae, et al. A 7.6 mW, 414 fs RMS-Jitter 10 GHz Phase-Locked Loop for a 40 Gb/s Serial Link Transmitter Based on a Two-Stage Ring Oscillator in 65 nm CMOS. IEEE J. Solid-State Circuits. 2016. Vol. 51.
10. S.-Y. Cho, et al.: A 5-GHz subharmonically injection-locked all digital PLL with complementary switched injection. IEEE ESSCIRC. 2015. 384 p.
11. C. Chiang, et al. A digital bang-bang phase-locked loop with bandwidth calibration. IEEE ASSCC.2015. 173 p
12. K.-Y. J. Shen, et al. A 0.17-to-3.5 mW 0.15-to-5 GHz SoC PLL with 15dB build-in supply noise rejection and self-bandwidth control in 14nm CMOS. ISSCC Dig. Tech. Papers. 2016. 330 p.

УДК 536.521

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ПИРОМЕТРА ПД-10

В. А. Захаренко, Я. Р. Веприкова, Д. В. Кузнецов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье приводятся результаты исследования постоянной времени оптоволоконного пирометра ПД-10. Приведена функциональная схема прибора. Изложены экспериментальные данные о быстродействии пирометра с фильтром и без него. Предложен способ борьбы с уровнем шума и увеличения быстродействия пирометра.**

Ключевые слова: абсолютно черное тело, температура расплавов, коэффициент черноты, постоянная времени, пирометр.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-133-136

I. Введение

В современной металлургической промышленности технологические процессы литья, проката, ковки контролируются в основном путём измерений такого параметра как температура в связи с необходимостью обеспечения и контроля заданных температурных режимов. Особую роль при этом играют точные температурные измерения в процессах литья стали, так как чем ниже температура стали при заливке в формы и чем скорей

происходит охлаждение отливки, тем плотней металл. [1, 2]. Кроме того, при соблюдении правильного температурного режима литья стали, можно избежать перегрева металла в плавильных печах. Это позволит сократить продолжительность плавки, избежать затрат на ремонт печи, а также снижаются расходы электроэнергии, топлива и огнеупоров.

Пережог стали наблюдается при таких высоких нагревах сплава, когда последний близок к точке начала плавления. В этом случае по границам зерен сплава начинается оплавление основной фазы и возможных примесей (эвтектик) и проникновение к ним кислорода (из воздуха), дающего с металлом и примесями неметаллические (окисные) включения или оболочки, разобщающие связь между зернами и этим сильно снижающие прочность и пластичность металла. При сильном пережоге такие неметаллические пленки вокруг зерен можно видеть на полированном шлифе даже без травления. Такие пленки уже нельзя удалить из металла термической обработкой, и пережженный металл становится непоправимым браком, годным лишь в переплавку [3].

Температура стали при розливе влияет на количество брака литых изделий. В табл. 1 приведены сведения о влиянии температуры, разливаемой стали на качество изделий.

ТАБЛИЦА 1
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗЛИВАЕМОЙ СТАЛИ НА КАЧЕСТВО КОВАНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ХРОМО НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

Температура при разливке	Количество изделий, %		
	1-й сорт	2-й сорт	3-й сорт
Очень высокая	70	20	10
Высокая	51	34	15
Пониженная	20	20	60

При высокой температуре стали уменьшается образование настылей в разливочных ковшах и количество ненормально залитых слитков.

Температура при заливке оказывает прямое влияние на прочностные свойства и износоустойчивость. В настоящее время при выплавке чёрных металлов за счёт недостоверности и инерционности процесса контроля температур расплавов получается около 5% брака. Стоимость литья из чёрных металлов составляет 70–80 рублей за килограмм. Соответственно за тонну 70–80 тысяч рублей. А стоимость литья из цветных металлов составляет 400–500 рублей за килограмм. За тонну 400–500 тысяч рублей. А также из-за перегрева или недогрева ухудшается качество получаемых из расплава деталей.

На основе анализа данных литературы можно сделать следующие выводы:

- Понижение температуры при заливке и уменьшение толщины стенки отливки из углеродистых и мелколегированных конструкционных сталей способствуют измельчению зерна и утонению межкристаллитных прослоек. Это понижает пластические характеристики и несколько повышает прочностные свойства металла.
- Изменяется в зависимости от температуры при заливке твердость. Уменьшение пластичности и увеличение прочности с понижением температуры заливаемой стали сохраняется и после термообработки.
- В условиях медленной кристаллизации и постепенного последующего остывания горячо залитой стали на границах крупных зерен выделяется больше твердых карбидов, которые ослабляют межзеренную связь и снижают показатели механических свойств.

В настоящее время в заводской практике в основном применяют метод контактных измерений температуры расплавов, а для высокотемпературных процессов используются разовые термоэлектрические преобразователи кратковременного погружения. Процессы скоростного индукционного нагрева и задачи автоматического поддержания заданных температур металлов делают малопригодными применение контактных средств, а тем более одноразовых.

Кроме того, необходимо повышать быстродействие измерений, особенно для индукционных печей малых объёмов как для задач автоматизации управления нагревом, так и для задачи обнаружения температурных полок, характеризующих эвтектики.

II. Постановка задачи

Для определения быстродействия пирометра ПД-10 были проведены исследования постоянной времени в целых и его отдельных узлах. На рис. 1 приведена структурная схема пирометра.

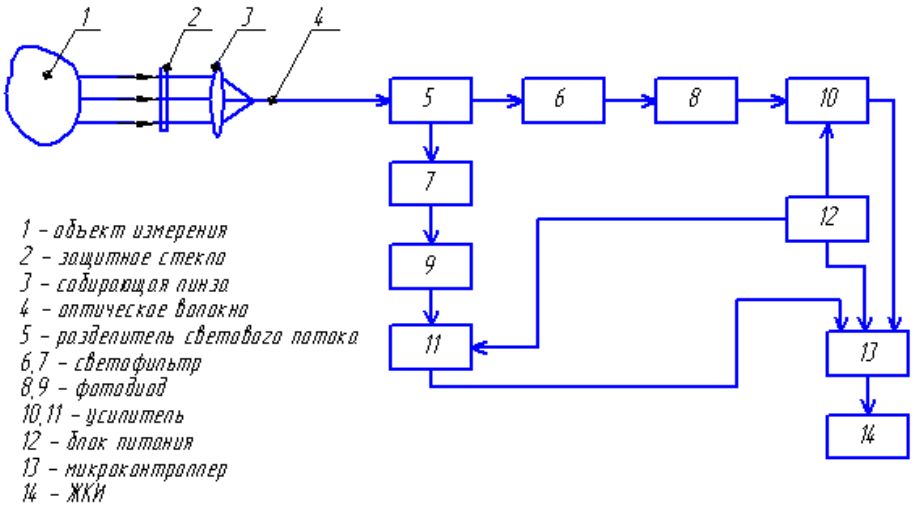


Рис. 1. Структурная схема пирометра

III. Теория

В настоящее время в радиотехнике постоянная времени характеризует длительность протекания переходного процесса, обычно это промежуток времени, в течение которого реакция схемы на единичный скачок достигает 0,63 от своего первоначального значения.

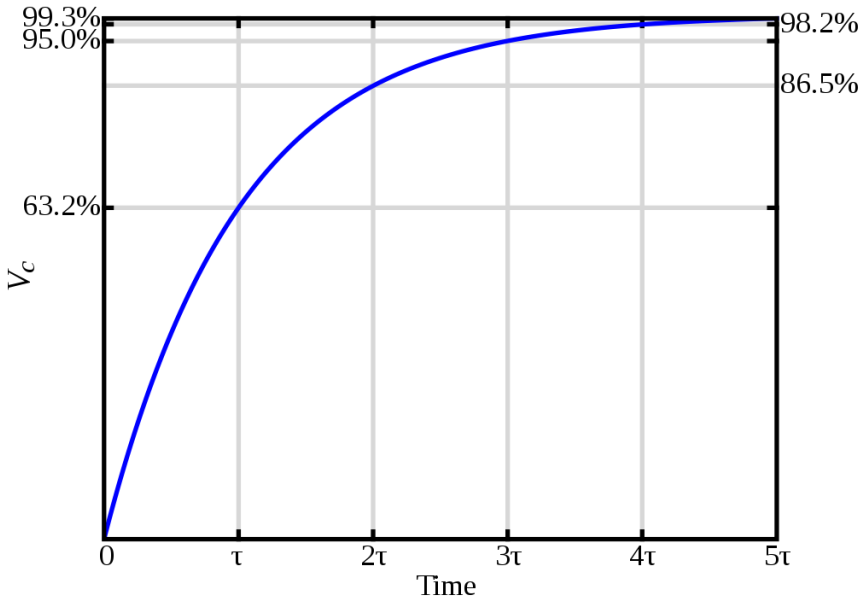


Рис. 2. Определение постоянной времени

IV. Результаты экспериментов

Для проведения эксперимента была создана схема, состоящая из пяти параллельно включенных светодиодов типа BL-L513IRAB с длиной волны равной 940 нм и пирометром ПД-10, изготовленным на АО НПП «Эталон». Максимум длины волны светодиодов был выбран исходя из чувствительности пирометра.

К полученному излучателю был подключен генератор высоких частот NF WF1943B. От генератора подавались прямоугольные импульсы. Частоту подаваемого сигнала повышали до тех пор, пока не зафиксировали на осциллограмме завал меандров. Функциональная схема экспериментальной установки представлена на Рис. 3.

Эксперимент проводился с фильтром и без. Фильтрация обеспечивалась конденсатором емкостью 0,1 мкФ. В результате серии экспериментов выяснили, что постоянная времени с фильтром составляет 2 мс, а без фильтра 0,4 мкс. При этом уровень шума был соизмерим с сигналом.

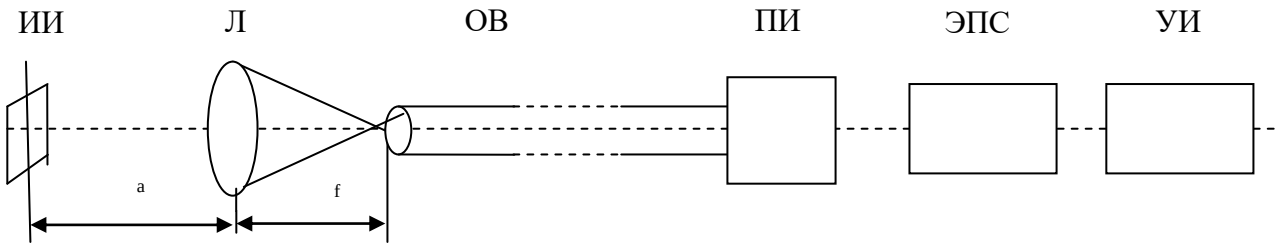


Рис. 3. Функциональная схема измерений оптоволоконного пирометра
ИИ – источник излучения с генератором высоких частот; Л – линза; а – расстояние от источника излучения до линзы; f – фокусное расстояние линзы; ОВ – оптическое волокно; ПИ – приемник излучения с электронной схемой усиления и цифровой обработки сигнала; ЭПС – электронный преобразователь сигнала; УИ – устройство индикации

V. Обсуждение результатов

По паспортным данным пирометра ПД-10 быстродействие прибора составляет 2 мс, что подтвердилось в результате эксперимента. А также выяснили, что без конденсатора уровень шума равен уровню получаемого сигнала. Поэтому необходимо уменьшать емкость до тех пор, пока уровень шума станет намного меньше уровня сигнала. При этом достигнуть максимального быстродействия.

VI. Выводы и заключение

В результате работы можно сделать следующие выводы: паспортные значения пирометра подтвердились, необходимо найти компромисс между быстродействием и уровнем шума.

Для уменьшения постоянной времени и уровня шумов необходимо провести следующую модернизацию пирометра: уменьшить емкость конденсатора фильтра, создать новое программное обеспечение, в котором внутренняя фильтрация сведена к минимуму.

Список литературы

1. Смирнов А. Н., Неделькович Л., Джурджевич М. [и др.]. Расчет температуры ликвидус стали // Сталь. 1996. № 3. С. 15–19.

2. Жуков Л. Ф., Гончаров А. Л., Бунза А. Б. [и др.]. Термоэлектрический и оптический периодический контроль температуры металла // Литье-2013: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. 2013. С. 80–81.

3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ДЫРОК В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

И. В. Иванов[1], А. Г. Козлов[2]
[1]*Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия*
[2]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

Аннотация. **В статье представлены результаты моделирования подвижности дырок в трёх политипах карбида кремния (SiC): 3C, 4H и 6H. Рассмотрены два подхода: использование температурно-зависимой модели Caughey-Thomas и применение модели Arora. Использованы параметры моделей, приведённые в литературе. Показано, что существующая модель подвижности дырок в 3C-SiC может быть значительно усовершенствована. Предложены новые параметры модели Arora, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC в широком диапазоне температур (100…1000 К). Кроме того, представлены температурные зависимости относительной погрешности моделирования подвижности для трёх рассмотренных политипов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании карбидокремниевых электронных приборов.**

Ключевые слова: 3C-SiC, карбид кремния, подвижность дырок, температурная зависимость подвижности.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-136-142

I. Введение

Карбид кремния (SiC) считается перспективным широкозонным полупроводниковым материалом для высоковольтной, высокотемпературной и силовой электроники. Он обладает экстраординарными электрофизическими свойствами и в настоящее время является коммерчески доступным. На основе SiC изготавливаются диоды различных типов, биполярные и полевые транзисторы, тиристоры и другие полупроводниковые приборы. Современное состояние SiC-электроники подробно описано в работах [1–5].

Существует большое количество различных политипов SiC. Широкое распространение в электронике получили политипы 3C, 4H и 6H. Основные области их применения различны. Так, на основе 3C-SiC изготавливаются силовые приборы, 4H-SiC применяется в силовой и высокочастотной электронике, а 6H-SiC используется при производстве светодиодов [6].

При проектировании полупроводниковых приборов возникает задача моделирования их характеристик. Надлежащему решению данной задачи способствует применение точных моделей основных электрофизических параметров используемых материалов. Одним из таких параметров является подвижность дырок.

II. Постановка задачи

В работе [7] была предложена модель Caughey-Thomas (CT), предназначенная для описания подвижности основных носителей заряда в кремнии как функции концентрации легирующих примесей. В дальнейшем она была дополнена параметром, необходимым для учёта влияния температуры. Коэффициенты, позволяющие моделировать температурную зависимость подвижности дырок в 4H- и 6H-SiC, были подобраны в работах [8, 9].

Модель Arora, характеризующаяся повышенной точностью, была предложена в работе [10]. В настоящее время она находит широкое применение при моделировании подвижности дырок во всех трёх рассматриваемых политипах SiC [11–13].

Целью данного исследования является анализ и доработка существующих температурно-зависимых моделей подвижности дырок в карбиде кремния трёх политипов: 3C, 4H и 6H.

III. Теория

Зависимость подвижности основных носителей заряда μ от концентрации примесей описывается моделью CT [7]

$$\mu(N_A, N_D) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}}, \quad (1)$$

где N_A – концентрация акцепторов; N_D – концентрация доноров; μ_{min}, μ_{max}, N_{ref} и α – параметры модели.

Следует отметить, что в работе [7] подвижность дырок описана как функция N_A. Однако подавляющее большинство современных авторов указывает на то, что подвижность (как дырок, так и электронов) является функцией суммы $N_A + N_D$ [9, 11, 12].

Влияние температуры T может быть учтено путём введения в (1) дополнительного параметра β [8, 9]:

$$\mu(N_A, N_D, T) = \mu_{min}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta}, \quad (2)$$

$$\mu(N_A, N_D, T) = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{N_{ref}}\right)^{\alpha}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta}, \quad (3)$$

где T_0 = 300 К.

Более точная модель Arora [10] основана на использовании выражения (1) с температурно-зависимыми параметрами

$$\mu_{min}(T) = \mu_0^{min}(T/T_0)^{\beta_{min}}, \quad (4)$$

$$\mu_{max}(T) = \mu_0^{max}(T/T_0)^{\beta_{max}}, \quad (5)$$

$$N_{ref}(T) = N_0^{ref}(T/T_0)^{\beta_N}, \quad (6)$$

$$\alpha(T) = \alpha_0(T/T_0)^{\beta_\alpha}, \quad (7)$$

где μ_0^{min}, μ_0^{max}, N_0^{ref} и α_0 – значения соответствующих параметров при $T = T_0$; β_{min}, β_{max}, β_{ref} и β_α – температурные коэффициенты.

Для вычисления погрешности аппроксимации δ может быть использовано выражение

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}\frac{(\mu'_j - \mu_j)^2}{\mu_j^2}} \times 100\%, \quad (8)$$

где M – число экспериментальных точек; μ'_j – вычисленное значение подвижности носителей заряда; μ_j – экспериментальное значение подвижности носителей заряда.

Описанные выше подходы широко используются при моделировании подвижности электронов и дырок в различных политипах SiC [8, 9, 11–15]. Следует отметить, что представленные модели описывают подвижность основных носителей заряда в слабом поле. Для анализа подвижности в сильном поле применяются другие модели [16], рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи.

IV. Результаты исследования

Были построены температурные зависимости подвижности дырок в 4H- и 6H-SiC, полученные на основе моделей (2, 3) и параметров, приведённых в работах [8] и [9] соответственно. В [8] отмечается, что температурный коэффициент β для 4H-SiC находится в диапазоне 1.8…2.0. В настоящем исследовании β принят равным 1.8, поскольку при этом ошибка аппроксимации δ минимальна. Результаты вычислений и экспериментальные данные [14, 17] представлены на рис. 1.

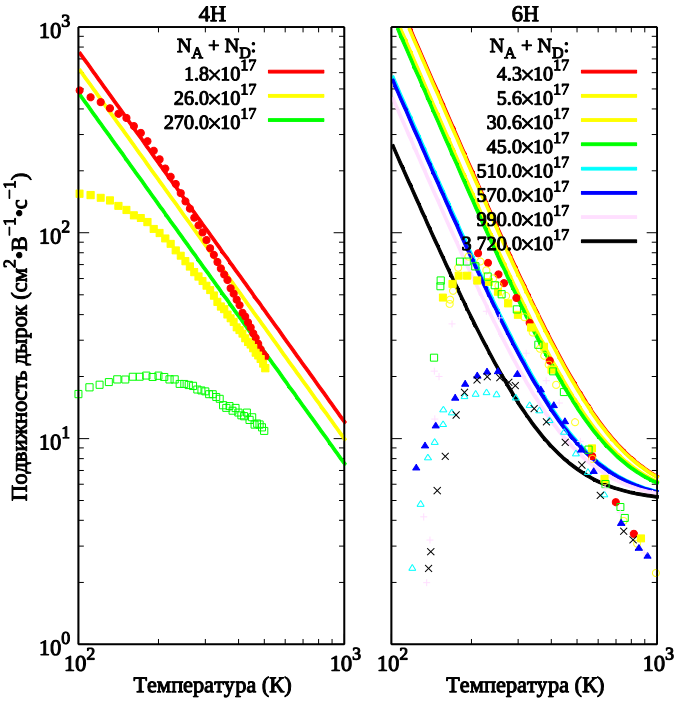


Рис. 1. Подвижность дырок (температурно-зависимая модель CT):
сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Видно, что температурно-зависимая модель CT не позволяет точно описывать подвижность дырок в широком диапазоне температур и концентраций. На интервале 300…600 К (силовые приборы обычно проектируются для работы при таких температурах [11, 18]) ошибка аппроксимации δ, вычисленная с использованием выражения (8), составила 125% для 4H- и 28% для 6H-SiC. Попытки моделирования подвижности дырок в 3C-SiC с помощью выражений (2) и (3), насколько известно авторам, в литературе не описаны.

Для получения более точных результатов были построены зависимости, полученные на основе модели Arora (1, 4–7) и параметров, приведённых в работах [11–13]. Результаты вычислений и экспериментальные данные ([19] для 3C-SiC) представлены на рис. 2.

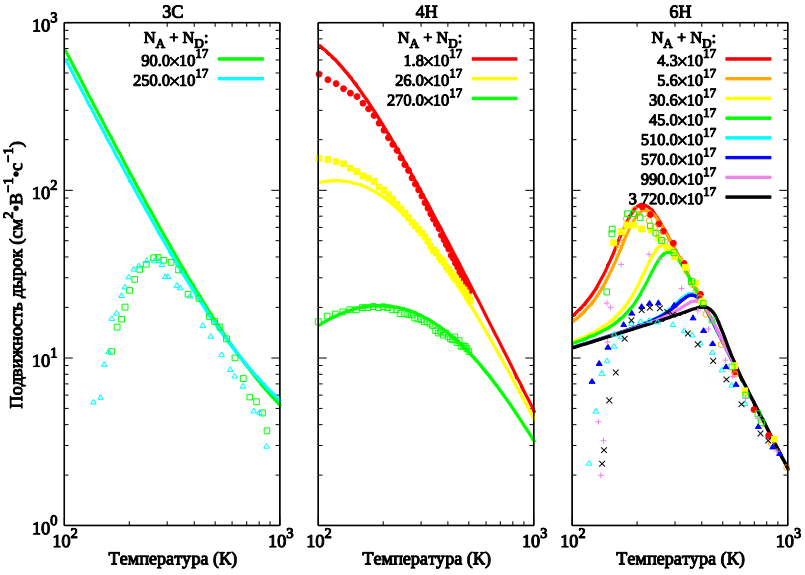


Рис. 2. Подвижность дырок (модель Arora):
сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Ошибка аппроксимации δ на интервале температур 300…600 К составила 26%, 6% и 36% для 3C-, 4H- и 6H-SiC соответственно. В диапазоне 100…1000 К она составила 11% (4H-SiC) и 94% (6H-SiC). Для 3C-SiC ошибка существенно превысила 100%. Таким образом, в широком диапазоне температур результаты моделирования с применением подхода Arora лучше согласуются с экспериментальными данными, чем результаты вычислений, основанных на уравнениях (2, 3). Однако параметры, приведённые в [11], не позволяют адекватно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC при температурах ниже 300 К.

Модель подвижности дырок в 3C-SiC была оптимизирована (рис. 3).

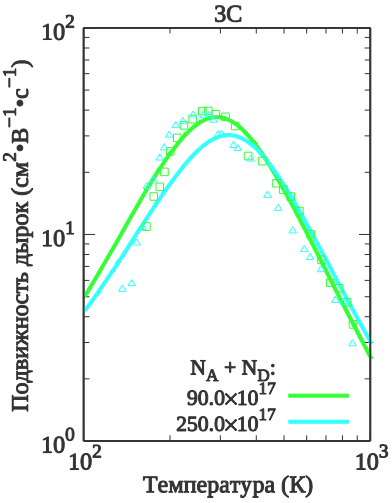


Рис. 3. Подвижность дырок в 3C-SiC (модель Arora с параметрами, предложенными в данной статье):
сплошные линии – результаты вычислений, точки – экспериментальные данные

Параметры температурно-зависимой модели CT и модели Arora, представленные в литературе, а также параметры, полученные в данной работе, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛЕЙ

Параметр	**Значение**					
	3C		4H		6H	
	Arora [11]	Arora (данная работа)	CT (2) [8]	Arora [12]	CT (3) [9]	Arora [13]
μ_0^{min} (см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$)	15.0	15.0	15.9	0.0	5.0	18.0
μ_0^{max} (см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$)	70.0	70.0	124.0	113.5	75.0	44.0
N_0^{ref} (см$^{-3}$)	5.00×10^{19}	4.50×10^{18}	1.76×10^{19}	2.40×10^{18}	1.00×10^{19}	1.50×10^{19}
α_0	0.30	0.55	0.34	0.69	0.50	1.60
β			−1.8		−3.0	
β_{min}	−0.50	1.30		−0.57		0.40
β_{max}	−2.5	−3.1		−2.6		−2.5
β_N	0.0	9.0		2.9		7.8
β_α	0.0	−0.2		−0.2		0.5
δ (%, 300…600 K)	26	23	125	6	28	36
δ (%, 100…1000 K)		26		11		94

Ошибка аппроксимации δ на интервале температур 100…1000 К составила 26%, то есть существенно снизилась. В диапазоне 300…600 К δ составила 23%, что несколько ниже ошибки, полученной при использовании параметров из [11] (δ = 26%). Модель, описанная в работе [15], также является менее точной (как в диапазоне 100…1000 К, так и на интервале 300…600 К). Таким образом, параметры модели Arora, предложенные в данной статье, способствуют более адекватному моделированию подвижности дырок в 3C-SiC.

V. Обсуждение результатов

В ходе работы были подобраны значения параметров, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC с помощью подхода Arora. Данные параметры могут быть использованы при моделировании характеристик электронных приборов, основанных на 3C-SiC, в процессе их проектирования.

Температурные зависимости относительной погрешности моделирования ε (%) были получены с использованием выражения

$$\varepsilon_j = \frac{\mu'_j - \mu_j}{\mu_j} \times 100\%.$$

Результаты вычисления ε для 3C-, 4H- и 6H-SiC приведены на рис. 4.

Видно, что модель Arora не позволяет точно описывать подвижность дырок в области низких температур. Так, максимальные абсолютные значения погрешности составляют 49% (при $N_A + N_D = 1.8\times10^{17}$ см$^{-3}$, T = 100 К) для 4H- и 561% (при $N_A + N_D = 9.9\times10^{19}$ см$^{-3}$, T = 136 К) для 6H-SiC. Максимальная погрешность моделирования подвижности дырок в 3C-SiC составляет 5 195% (при $N_A + N_D = 2.5\times10^{19}$ см$^{-3}$, T = 136 К) для параметров из [11] и 66% (при $N_A + N_D = 2.5\times10^{19}$ см$^{-3}$, T = 147 К) для параметров, предложенных в данной статье. Полученные температурные зависимости погрешности моделирования могут быть полезны при проектировании электронных приборов на основе SiC.

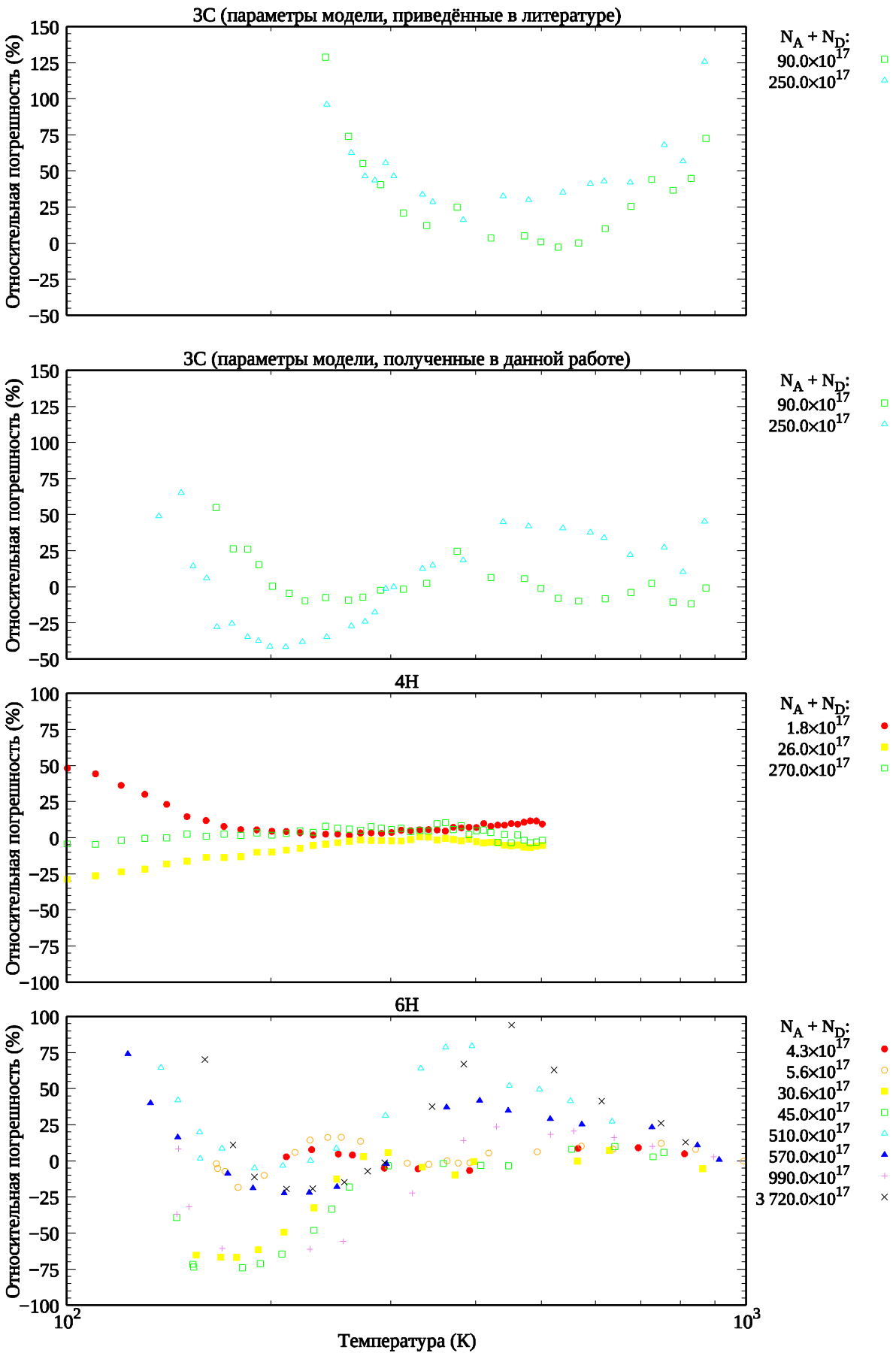


Рис. 4. Температурные зависимости относительной погрешности моделирования

VI. Выводы и заключение

Подобраны значения параметров, позволяющие более точно моделировать подвижность дырок в 3C-SiC на основе подхода Arora. Кроме того, получены температурные зависимости относительной погрешности моделирования подвижности дырок в 3C-, 4H- и 6H-SiC. Представленные результаты могут быть использованы при проектировании карбидокремниевых электронных приборов.

Список литературы

1. She X., Huang A. Q, Lucía Ó., Ozpineci B. Review of silicon carbide power devices and their applications // IEEE Trans. Ind. Electron. 2017. Vol. 64, no. 10. P. 8193–8205. DOI:10.1109/TIE.2017.2652401.

2. Iacopi F., Van Hove M., Charles M., Endo K. Power electronics with wide bandgap materials: toward greener, more efficient technologies // MRS Bull. 2015. Vol. 40, no. 5. P. 390–395. DOI:10.1557/mrs.2015.71.

3. Kimoto. T. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54, no. 4. P. 040103. DOI:10.7567/JJAP.54.040103.

4. Millán J., Godignon P., Perpiñà X., Pérez-Tomás A., Rebollo J. A survey of wide bandgap power semiconductor devices // IEEE Trans. Power Electron. 2014. Vol. 29, no. 5. P. 2155–2163. DOI:10.1109/TPEL.2013.2268900.

5. Kaminski N., Hilt O. SiC and GaN devices – wide bandgap is not all the same // IET Circuits, Devices Syst. 2014. Vol. 8, no. 3. P. 227–236. DOI:10.1049/iet-cds.2013.0223.

6. Saddow S. E. Silicon carbide materials for biomedical applications // Silicon carbide biotechnology: a biocompatible semiconductor for advanced biomedical devices and applications, 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2016. P. 1–25. DOI:10.1016/B978-0-12-802993-0.00001-0.

7. Caughey D. M., Thomas R. E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field // Proc. IEEE. 1967. Vol. 55, no. 12. P. 2192–2193. DOI:10.1109/PROC.1967.6123.

8. Schaffer W. J., Negley G. H., Irvine K. G., Palmour J. W. Conductivity anisotropy in epitaxial 6H and 4H SiC // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 1994. Vol. 339. P. 595–600. DOI:10.1557/PROC-339-595.

9. Ruff M., Mitlehner H., Helbig R. SiC devices: physics and numerical simulation // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. Vol. 41, no. 6. P. 1040–1054. DOI:10.1109/16.293319.

10. Arora N. D., Hauser J. R., Roulston D. J. Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 1982. Vol. ED-29, no. 2. P. 292–295. DOI:10.1109/T-ED.1982.20698.

11. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Gyftakis K. N., Perkins S., Antoniou M. Validated physical models and parameters of bulk 3C-SiC aiming for credible technology computer aided design (TCAD) simulation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 10. P. 104009. DOI:10.1088/1361-6641/aa856b.

12. Hatakeyama T., Fukuda K., Okumura H. Physical models for SiC and their application to device simulations of SiC insulated-gate bipolar transistors // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. Vol. 60, no. 2. P. 613–621. DOI:10.1109/TED.2012.2226590.

13. Ivanov I. V., Kozlov A. G. Hole mobility model for 6H-SiC thermoresistive sensors simulation // Proc. SIBCON, Apr. 18–20, 2019. Tomsk, Russia, 2019. URL: http://ieee.tpu.ru/sibcon/sbornik/papers/u730.pdf (дата обращения: 07.03.2019).

14. Koizumi A., Suda J., Kimoto T. Temperature and doping dependencies of electrical properties in Al-doped 4H-SiC epitaxial layers // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106, no. 1. P. 013716. DOI:10.1063/1.3158565.

15. Arvanitopoulos A., Lophitis N., Perkins S., Gyftakis K. N., Belanche Guadas M., Antoniou M. Physical parameterisation of 3C-silicon carbide (SiC) with scope to evaluate the suitability of the material for power diodes as an alternative to 4H-SiC // Proc. IEEE SDEMPED, Aug. 29–Sept. 1, 2017. Tinos, Greece, 2017. P. 565–571. DOI:10.1109/DEMPED.2017.8062411.

16. Canali C., Majni G., Minder R., Ottaviani G. Electron and hole drift velocity measurements in silicon and their empirical relation to electric field and temperature // IEEE Trans. Electron Devices. 1975. Vol. 22, no. 11. P. 1045–1047. DOI:10.1109/T-ED.1975.18267.

17. Van Daal H. J., Knippenberg W. F., Wasscher J. D. On the electronic conduction of α-SiC crystals between 300 and 1500°K // J. Phys. Chem. Solids. 1963. Vol. 24, no. 1. P. 109–127. DOI:10.1016/0022-3697(63)90046-5.

18. Zetterling C.-M., Hallén A., Hedayati R., Kargarrazi S., Lanni L., Malm B. G., Mardani S., Norström H., Rusu A., Suvanam S. S., Tian Y., Östling M. Bipolar integrated circuits in SiC for extreme environment operation // Semicond. Sci. Technol. 2017. Vol. 32, no. 3. P. 034002. DOI:10.1088/1361-6641/aa59a7.

19. Yamanaka M., Daimon H., Sakuma E., Misawa S., Yoshida S. Temperature dependence of electrical properties of n- and p-type 3C-SiC // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61, no. 2. P. 599–603. DOI:10.1063/1.338211.

УДК 544.22:621.315.592

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ «ЭЛЕКТРОННОГО НОСА»

В. Е. Леонов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Представлен способ получения твёрдых растворов системы CdSe-ZnS методом изотермической диффузии в режиме программированного нагрева. Приведены результаты рентгенографического анализа, согласно которым исследуемые объекты идентифицированы как твёрдые растворы замещения. Представлены результаты исследований кислотно-основных свойств твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ методами гидролитической адсорбции, механохимического диспергирования и неводного кондуктометрического титрования и адсорбционных свойств статическим методом с применением вакуумной установки. Показана возможность прогнозирования практического применения изучаемых объектов в качестве материалов для входящих в состав мультисенсорной системы «электронный нос» сенсоров экологического назначения.**

Ключевые слова: алмазоподобный полупроводник, твёрдый раствор, сенсор, электронный нос.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-143-151

I. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводники – весьма многочисленный класс материалов, в который входят сотни соединений. Полупроводниковые свойства присущи кристаллическим и аморфным веществам, твердым и жидким, неорганическим и органическим. При существенных различиях в строении и химическом составе полупроводниковые материалы способны сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий.

В настоящее время вследствие своих уникальных физико-химических свойств алмазоподобные полупроводники находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности, в качестве материалов для сенсоров экологического назначения. При этом благодаря своим уникальным свойствам бинарные вещества $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ и твёрдые растворы на их основе представляют наибольший интерес. Например, селенид кадмия CdSe [9, 11] и сульфид цинка ZnS [1, 7, 10] вследствие своих оптических свойств используются как люминофоры.

Адсорбция – концентрирование веществ на границе раздела фаз или в порах твёрдого тела. Адсорбент – более плотная фаза, которая определяет форму поверхности (может быть в жидком или твёрдом состоянии). Адсорбат – перераспределяющееся на поверхности вещество. Адсорбтив – вещество, которое находится не на поверхности, но способное адсорбироваться. Адсорбат и адсорбтив могут быть в жидком или газообразном состоянии. В зависимости от того, имеет ли место химическое взаимодействие между адсорбатом и адсорбентом, адсорбция подразделяется на физическую адсорбцию и химическую адсорбцию (хемосорбцию). Физическая адсорбция (физадсорбция) – адсорбция, при которой адсорбат и адсорбент химически не взаимодействуют. Хемосорбция – адсорбция, при которой адсорбат и адсорбент химически взаимодействуют [8].

Твёрдые растворы системы ZnSe-CdSe с большой долей вероятности могут быть использованы в качестве материалов для сенсоров экологического назначения, потому что обладают уникальными адсорбционными свойствами. Как показано в [5], величина адсорбции аммиака на поверхности твёрдых растворов системы ZnSe-CdSe с ростом температуры убывает, что свидетельствует о том, что имеет место физадсорбция. В [3] представлены результаты исследования адсорбции водорода и кислорода на поверхности твёрдых растворов системы ZnSe-CdSe, на основании которых было установлено протекание нескольких форм адсорбции: физадсорбции и двух форм хемосорбции. На данный момент физико-химические свойства твёрдых растворов недостаточно изучены. В связи с этим была поставлена цель – получить твёрдые растворы системы CdSe-ZnS и исследовать их свойства.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является изучение возможности практического применения твёрдых растворов системы CdSe-ZnS в качестве материалов для сенсоров аммиака, которые входят в состав мультисенсорной системы «электронный нос». Была поставлена задача – решить вопрос о возможности применения твёрдых растворов алмазоподобных полупроводников в качестве материалов для сенсоров экологического назначения. Данная задача связана с тем, что, в отличие от бинарных полупроводниковых веществ, свойства твёрдых растворов недостаточно изучены. Для решения задачи были проведены исследования адсорбционных свойств твёрдых растворов.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методом изотермической диффузии в режиме программированного нагрева были получены твёрдые растворы системы CdSe-ZnS. В вакуумированных и запаянных кварцевых ампулах из порошков CdSe и ZnS при температуре ниже температуры плавления легкоплавкого компонента (CdSe) получен непрерывный ряд твёрдых растворов замещения. Состав полученных объектов приведён в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
СОСТАВ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ п/п	Состав
1	$(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$
2	$(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$
3	$(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$
4	$(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$

По результатам рентгенографического анализа были получены дифрактограммы, по которым были построены штрих-рентгенограммы (рис. 1).

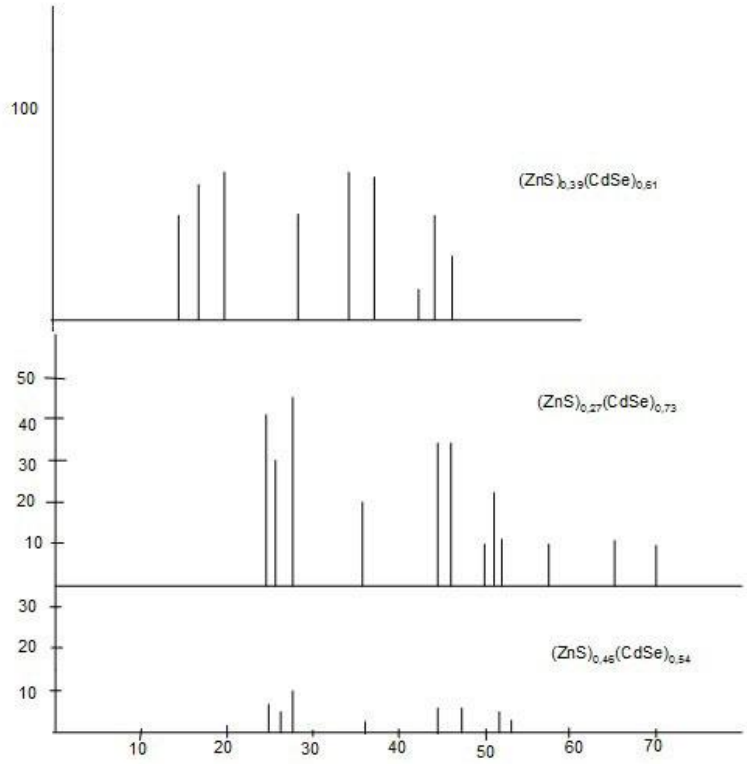


Рис. 1. Штрих-рентгенограммы

На рентгенограммах соответствующие непрореагировавшим бинарным компонентам дополнительные линии и размытость основных линий отсутствуют, следовательно, синтез твёрдых растворов полностью завершён. Исследуемые образцы – твёрдые растворы замещения с кристаллической структурой типа вюрцита. Параметры кристаллической решётки объектов исследования приведены в табл. 2 [2, 4, 6].

ТАБЛИЦА 2
ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$

Образец	Параметры кристаллической решётки	
	Параметр a, Å	Параметр c, Å
$(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$	4,163640(24)	6,79497(10)
$(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$	4,12083(14)	6,72628(53)
$(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$	4,083877(33)	6,667321(98)

Были исследованы кислотно-основные свойства исследуемых объектов: pH изоэлектрического состояния, зависимость pH от времени и концентрация кислотных центров. Для исследования были применены методы гидролитической адсорбции, механохимического диспергирования и неводного кондуктометрического титрования.

pH изоэлектрического состояния ($pH_{изо}$) бинарных веществ ZnS и CdSe и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ был определён методом гидролитической адсорбции. Значения $pH_{изо}$ исследуемых объектов приведены в таблице 3, график зависимости $pH_{изо}$ от состава – на рис. 2.

ТАБЛИЦА 3

$pH_{изо}$ БИНАРНЫХ ВЕЩЕСТВ ZnS, CdSe И ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Образец	**$pH_{изо}$**
CdSe	7,92
$(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$	6,97
$(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$	6,87
$(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$	6,38
$(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$	7,08
ZnS	6,16

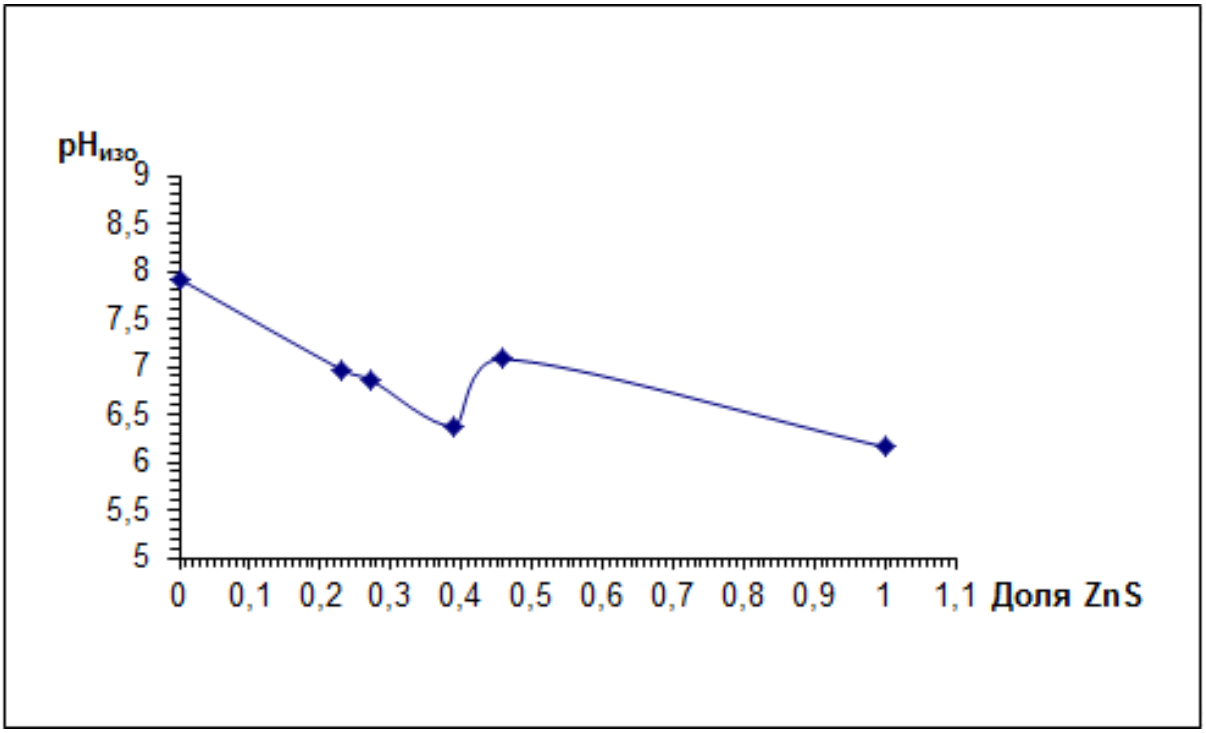


Рис. 2. Зависимость $pH_{изо}$ от состава исследуемых объектов

Полученные методом гидролитической адсорбции величины $pH_{изо}$ CdSe, ZnS и твёрдых растворов на их основе свидетельствуют о том, что поверхность сульфида цинка и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ (x=23, 27, 39 % мол.) имеет слабокислый характер, а поверхность селенида кадмия и твёрдого раствора $(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$ – слабощелочной. Поэтому ZnS и твёрдые растворы $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ (x=23, 27, 39 % мол.) активны по отношению к основным газам, а селенид кадмия и твёрдый раствор $(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$ активны по отношению к кислотным газам [4, 6].

Зависимость pH от времени была определена методом механохимического диспергирования. В ходе механохимического диспергирования сульфида цинка, селенида кадмия и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ (x=23, 27, 39, 46 % мол.) было обнаружено смещение pH в слабокислую область. При этом, по сравнению с результатами гидролитической адсорбции, имеет место подкисление поверхности CdSe и твёрдых растворов и подщелачивание поверхности ZnS. По результатам механохимического диспергирования был сделан вывод о слабокислом характере поверхности исследуемых объектов. Значения pH объектов исследования приведены в табл. 4, график зависимости pH, полученных в ходе механохимии, от состава – на рис. 3.

ТАБЛИЦА 4
pH CdSe, ZnS И ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$

Образец	pH
CdSe	6
$(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$	6,25
$(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$	6,47
$(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$	4,67
$(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$	6,2
ZnS	6,57

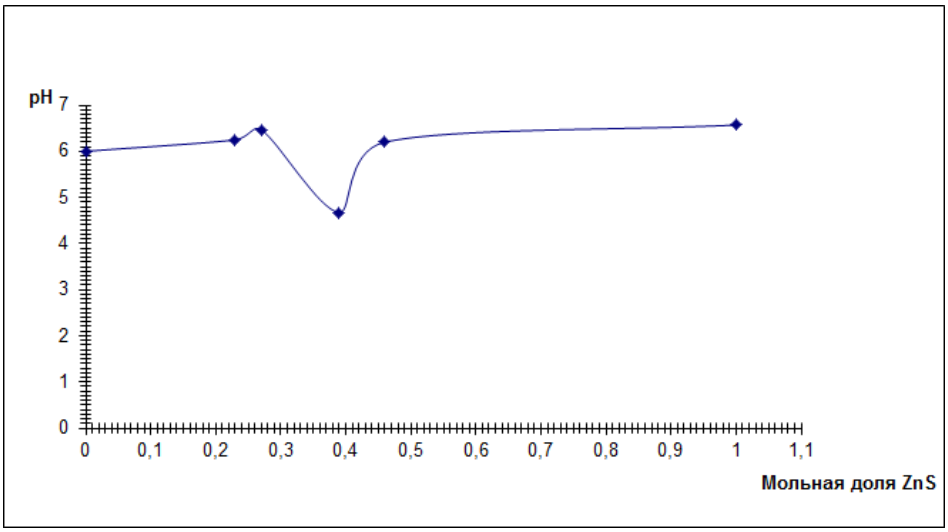


Рис. 3. Зависимость pH от состава

Концентрация кислотных центров на поверхности CdSe, ZnS и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ была определена методом неводного кондуктометрического титрования. Порошки исследуемых объектов заливали растворителем (метилэтилкетоном), для установления равновесия систему оставляли на один час, затем титровали раствором этилата калия. В процессе титрования фиксировалось изменение электропроводности смесей CdSe, ZnS и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ и метилэтилкетона в зависимости от объёма этилата калия. Концентрация кислотных центров была вычислена по формуле:

$$C = \frac{1000VN}{m}, \qquad (1)$$

где m – масса исследуемого образца, г; V – объём этилата калия, пошедшего на титрование, мл; N – нормальная концентрация раствора этилата калия, г-экв/л.

Величины концентраций кислотных центров приведены в табл. 5, график зависимости концентрации кислотных центров от состава – на рис. 4 [6].

ТАБЛИЦА 5
КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОТНЫХ ЦЕНТРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ZnS, CdSe
И ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$

Образец	Концентрация кислотных центров
CdSe	122860
$(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$	123089
$(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$	55406
$(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$	237252
$(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$	129500
ZnS	111888

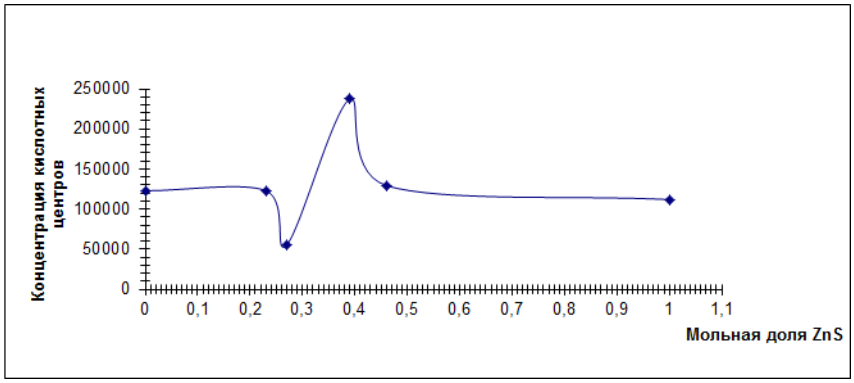


Рис. 4. Зависимость концентрации кислотных центров от состава

С целью рекомендации практического применения в качестве материалов для сенсоров экологического назначения были исследованы адсорбционные свойства сульфида цинка, селенида кадмия и твёрдых растворов на их основе. Адсорбенты – сульфид цинка ZnS, селенид кадмия CdSe и твёрдые растворы $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$. В качестве адсорбата был выбран продукт разложения использующейся в качестве компонента взрывных устройств аммиачной селитры – аммиак. Этот выбор обусловлен основными свойствами аммиака, а также результатами исследований кислотно-основных свойств исследуемых объектов, согласно которым поверхность последних имеет слабокислый характер. Адсорбируясь на поверхности ZnS, CdSe и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$, аммиак химически взаимодействует с адсорбентами по донорно-акцепторному механизму. В ходе реакции аммиака с сульфидом цинка, селенидом кадмия и твёрдыми растворами на их основе неподелённая электронная пара аммиака перемещается на внешние энергетические уровни атомов Zn и Cd. По результатам исследований были установлены зависимости $\alpha(NH_3)=f(T)$ (Рис. 5 – 10). Анализ кривых изобар адсорбции показал, что при температуре 323 К имеет место сверхаддитивность для твёрдого раствора $(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$ (Рис. 11). Активные центры адсорбции на поверхности ZnS и CdSe – координационно-ненасыщенные атомы Zn и Cd и вакансии S и Se. При образовании твёрдых растворов концентрация активных центров повышается. Этим объясняется сверхаддитивность.

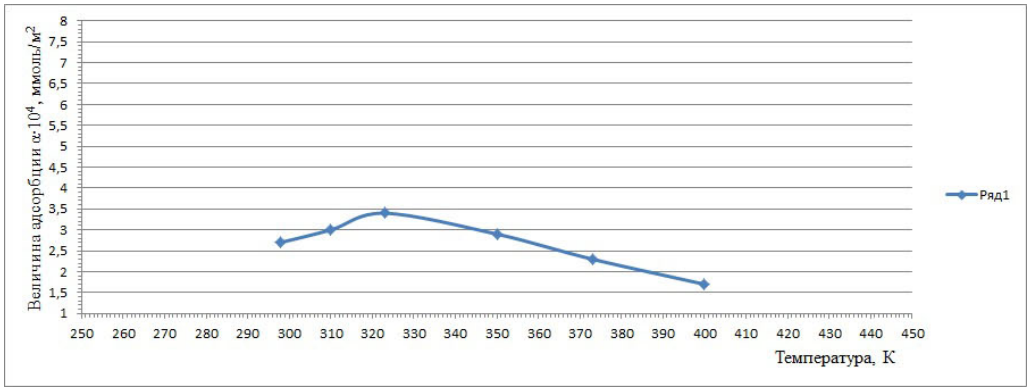


Рис. 5. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности ZnS от температуры.

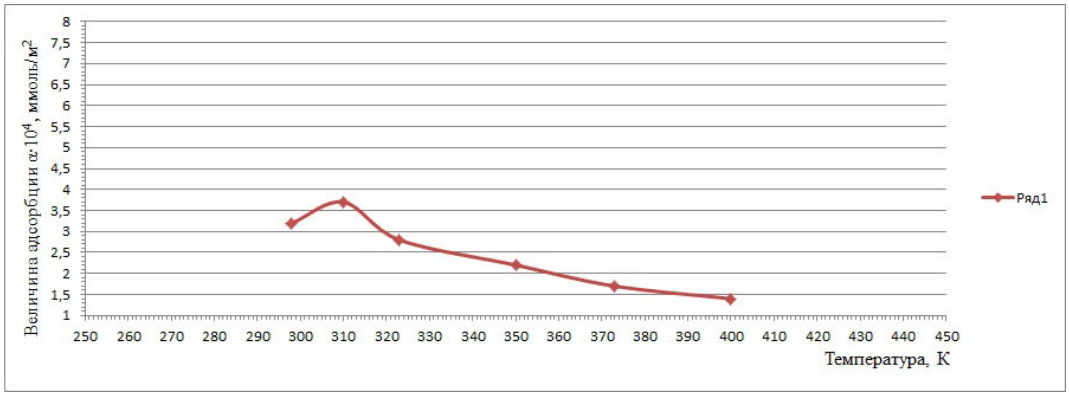


Рис. 6. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности CdSe от температуры

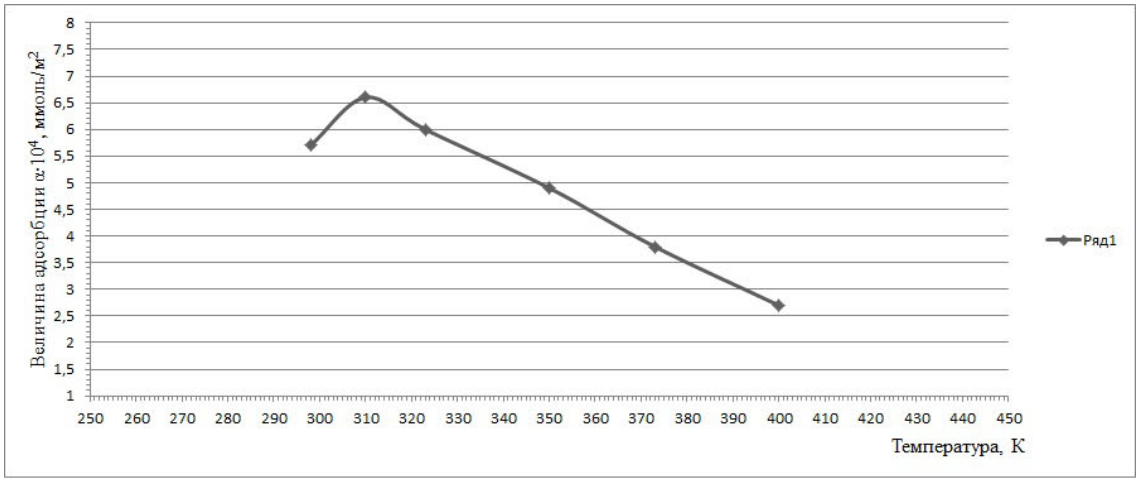


Рис. 7. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности твёрдого раствора $(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$ от температуры

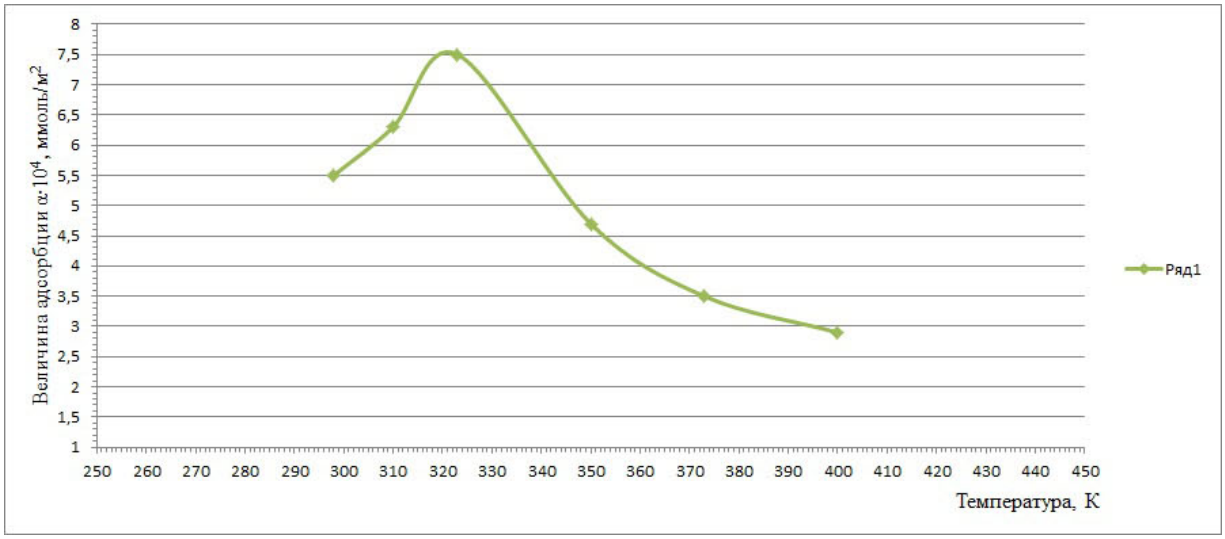


Рис. 8. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности твёрдого раствора $(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$ от температуры

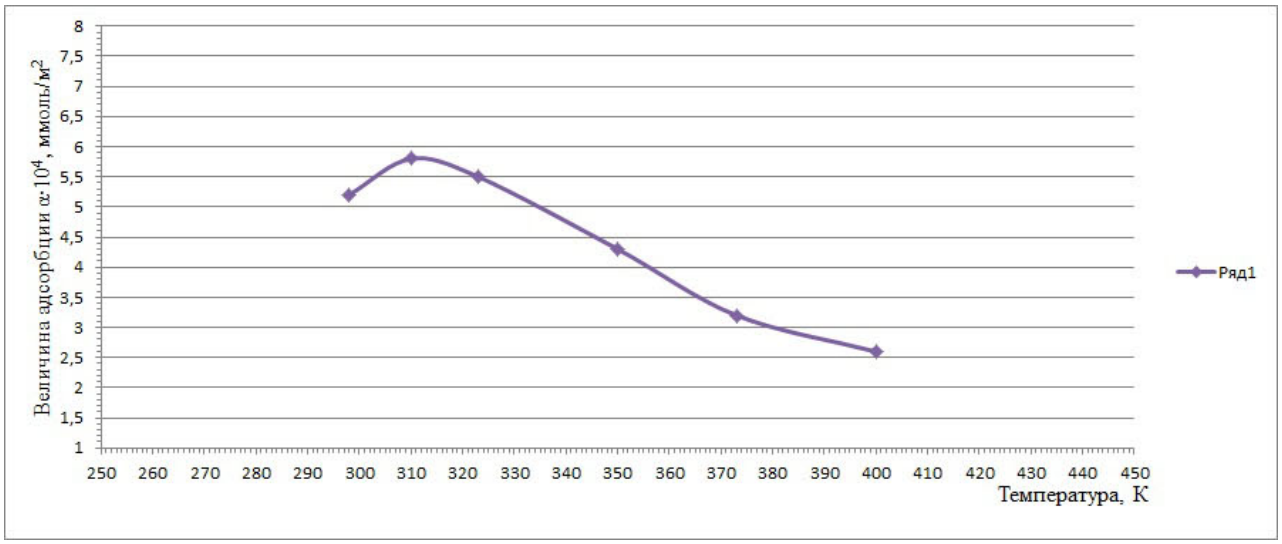


Рис. 9. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности твёрдого раствора $(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$ от температуры

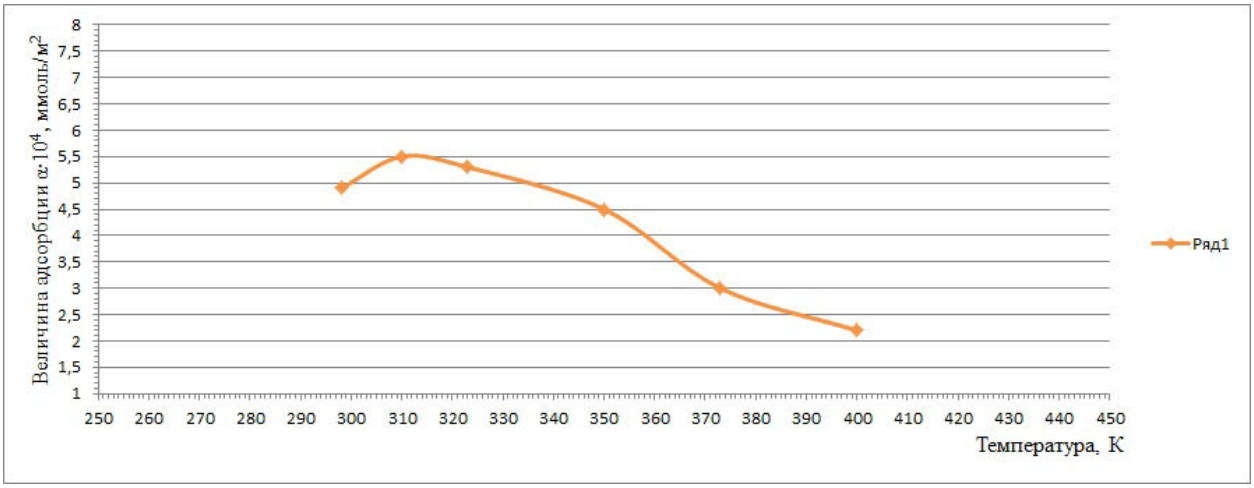


Рис. 10. Зависимость величины адсорбции аммиака на поверхности твёрдого раствора $(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$ от температуры

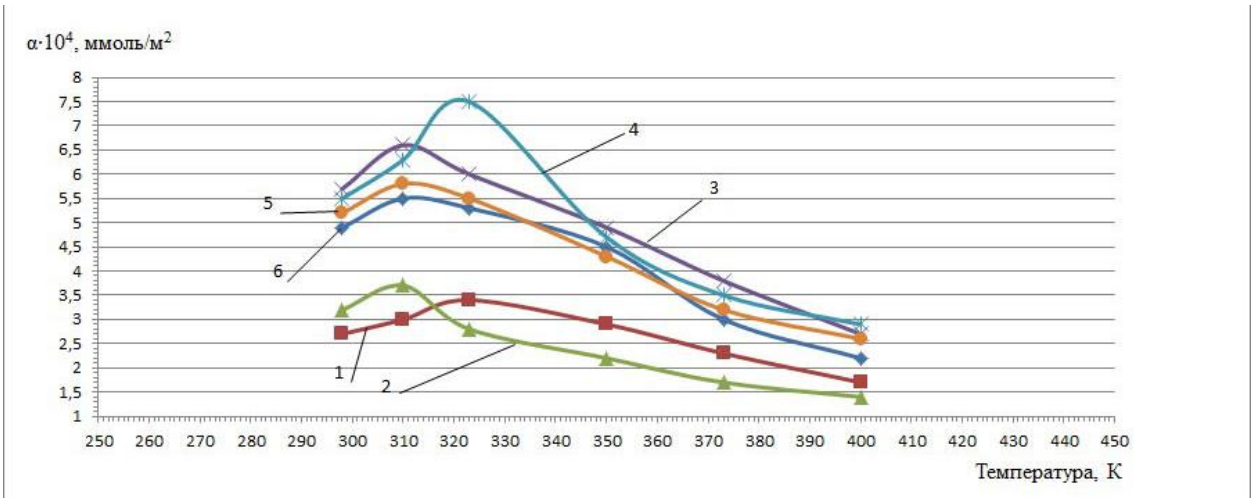


Рис. 11. Зависимости величин адсорбции аммиака на поверхностях объектов исследования от температуры: 1 – ZnS; 2 – CdSe; 3 – $(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$; 4 – $(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$; 5 – $(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$; 6 – $(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$

Данные представленные в таблице 5, были обработаны методом главных компонент с помощью программы Matlab 6.5, Matlab-код которой приведён ниже. В ходе обработки данных были построены графики (рис. 12), на которых показаны данные таблицы 5 в исходных координатах (рис. 12a) и в координатах главных компонент (рис. 12b). Представленные на рис. 12b данные распределены по шести кластерам, каждый из которых соответствует конкретному исследуемому объекту.

```
function [T, P] = pcanipals(X, numberPC)
[X_r, X_c] = size(X); P=[]; T=[];
if lenfth(numberPC) > 0
        pc = numberPC{1};
elseif (length(numberPC) == 0) & X_r < X_c
        pc = X_r;
else
        pc = X_c;
end;
for k = 1:pc
        P1 = rand(X_c, 1); T1 = X * P1; d0 = T1'*T1;
        P1 = (T1' * X/(T1' * T1))'; P1 = P1/norm(P1); T1 = X * P1; d = T1' * T1;
```

```
    while d - d0 > 0.0001;
        P1 = (T1' * X/(T1' * T1)); P1 = P1/norm(P1); T1 = X * P1; d0 = T1'*T1;
        P1 = (T1' * X/(T1' * T1)); P1 = P1/norm(P1); T1 = X * P1; d = T1'*T1;
    end
    X = X - T1 * P1; P = cat(1, P, P1'); T = [T,T1];
end
```

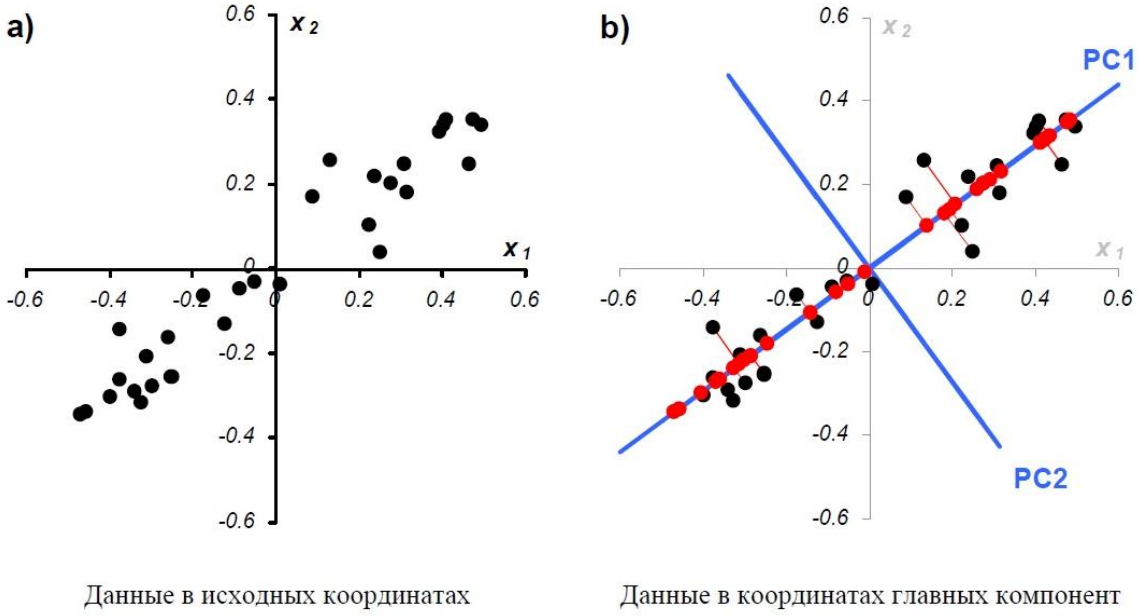


Рис. 12. Графическая иллюстрация метода главных компонент

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом изотермической диффузии по разработанной программе впервые были получены твёрдые растворы системы CdSe-ZnS. По результатам рентгенографического анализа исследуемые объекты были идентифицированы как твёрдые растворы замещения.

По результатам измерений pH изоэлектрического состояния было выявлено, что CdSe и твёрдый раствор $(ZnS)_{0,46}(CdSe)_{0,54}$ имеют слабощелочную поверхность, и потому активны по отношению к кислотным газам. В свою очередь поверхность ZnS и твёрдых растворов $(ZnS)_{0,23}(CdSe)_{0,77}$, $(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$ и $(ZnS)_{0,39}(CdSe)_{0,61}$ слабокислая, следовательно, указанные объекты активны по отношению к основным газам.

Согласно результатам механохимических исследований, поверхность изучаемых объектов имеет слабокислый характер. Поэтому они проявляют активность по отношению к основным газам. Таким образом, CdSe, ZnS и твёрдые растворы на их основе могут быть использованы в качестве сенсоров экологического назначения, входящих в состав мультисенсорной системы «электронный нос».

Статическим методом с применением вакуумной установки были исследованы адсорбционные свойства твёрдых растворов системы CdSe-ZnS. Установлено, что активными центрами адсорбции являются координационно-ненасыщенные атомы цинка и кадмия и вакансии серы и селена. Была выявлена сверхаддитивность для твёрдого раствора $(ZnS)_{0,27}(CdSe)_{0,73}$. В связи с этим, этот твёрдый раствор может быть использован в качестве материала для сенсоров экологического назначения.

Была проведена обработка результатов исследования адсорбционных свойств ZnS, CdSe и твёрдых растворов $(ZnS)_x(CdSe)_{1-x}$ посредством программы Matlab.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахметьев В. В. [и др.]. Влияние ударно-волновой обработки на свойства ZnS и люминофоров на его основе // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 9. С. 1002–1006.

2. Кировская И. А., Миронова Е. В., Григан А. А., Леонов В. Е. Новые материалы на основе систем ZnS-CdSe, ZnS-CdS // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2015. № 2. С. 164–168.

3. Кировская И. А. Поверхностные свойства алмазоподобных полупроводников. Твёрдые растворы. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. 116 с.

4. Кировская И. А., Миронова Е. В., Леонтьева Н. Н., Леонов В. Е., Блесман А. И., Полонянкин Д. А., Юрьева А. В. Получение и физико-химические исследования новых адсорбентов на основе системы CdSe-ZnS // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2015. № 1 (137). С. 236–240.

5. Кировская И. А. Твёрдые растворы бинарных и многокомпонентных полупроводниковых систем: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 400 с.

6. Кировская И. А., Миронова Е. В., Косарев Б. А., Григан А. А., Леонов В. Е. The Activity of New Materials Surfaces – ternary Semi-conductors with Cationic and Anionic Substitution // Procedia engineering. 2015.Vol. 113. P. 446–450.

7. Крылов П. Н., Гильмутдинов Ф. З., Романов Э. А., Федотова И. В. Влияние термоотжига на оптические свойства нанокристаллических плёнок сульфида цинка // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, № 11. С. 1571–1575.

8. Макаревич Н. А., Богданович Н. И. Теоретические основы адсорбции: учебное пособие / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2015. 362 с.

9. Сенокосов Э. А. [и др.]. Катодолюминесценция фоточувствительных слоёв CdSe, выращенных в квазизамкнутом объёме // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 12. С. 1299–1302.

10. Софронов Д. С. [и др.]. Влияние условий осаждения на размер и оптические свойства частиц ZnS // Неорганические материалы. 2014. Т. 50, № 7. С. 703–707.

11. Степанов Е. М. Исследование фотолюминесценции коллоидных квантовых точек на основе халькогенидов металлов // Молодой учёный. 2015. № 9. С. 56–60.

УДК 621.373

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

К. О. Николайчук[1], А. В. Щелканов[2]
[1]*ООО «Мэджик Кристалл», г. Омск, Россия*
[2]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

Аннотация. **При серийном производстве кварцевых генераторов актуальна задача их проверки. В статье описана методика, позволяющая осуществить их испытание на провал активности. Методика заключается в следующем: в камере тепла-холода кварцевый генератор выдерживается при температуре – 60 °С, после чего на него кратковременно подаётся питание, с последующим измерением частоты его выходного сигнала. Кратковременное включение и выключение приводит к плавному нагреву пьезоэлемента. Описанный способ позволяет определять провал активности кварцевого резонатора. Приведены структурная схема установки, реализующей данную методику, и результаты испытаний кварцевых генераторов.**

Ключевые слова: генератор, провал активности, мода колебаний, кварцевый резонатор.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-151-156

I. Введение

Кварцевые генераторы как наиболее стабильные частотозадающие устройства применяются в различных областях техники, таких как навигация, радиолокация, метрология, телекоммуникация. Качество и устойчивость радиосвязи, точность измерения электрических и неэлектрических величин, определение координат, требует стабильный, надёжный источник опорных колебаний.

Расширение областей применения кварцевых генераторов и ужесточение условий эксплуатации привело к повышению технических требований к ним. Термодинамический эффект, кратковременная нестабильность, долговременная нестабильность, повышение температурной стабильности, минимальный силовой коэффициент частоты – все эти параметры существенно улучшились с появлением двухповоротных срезов кварцевых резонаторов. Широкое применение в термостатированных кварцевых генераторах получили срезы типа SC и IT, которые практически вытеснили резонаторы других срезов.

В отличие от наиболее популярного одноповоротного AT-среза, двухповоротные имеют основное преимущество – меньшее влияние механических и температурных воздействий на частоту кварцевого генератора. Однако наряду с достоинствами двухповоротные срезы имеют и недостатки: им свойственны сложная процеду-

ра распиловки кристалла на пластины и недостаточная моночастотность. Последний недостаток является существенным, он связан с высокой активностью побочных колебаний.

II. Постановка задачи

В пьезоэлементах с двухповоротным срезом, угол α и β определяет ориентацию пластины относительно осей кварца. Перпендикулярное плоскости среза электрическое поле возбуждает три компоненты деформаций. Возникшие толщинные колебания, которые называются A, B и C, приводят к ухудшению частотного спектра кварцевых резонаторов [1].

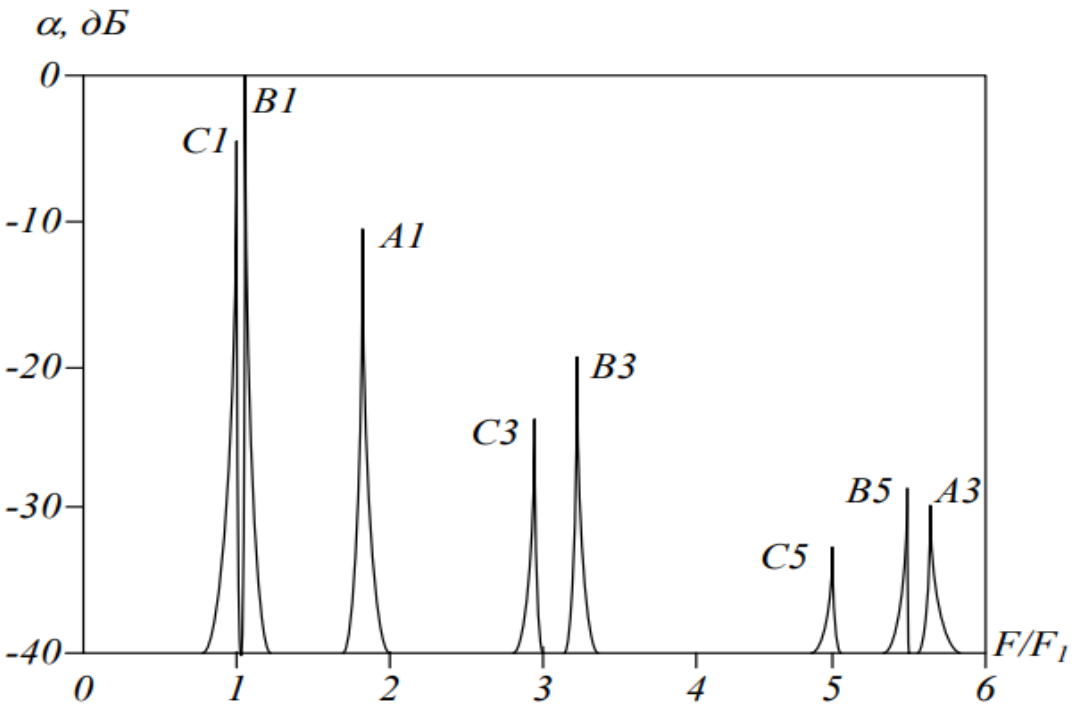


Рис. 1. Спектр частот кварцевого резонатора SC-среза

На рис. 1 отражен спектр мод кварцевого резонатора SC-среза. Тип возбуждаемой моды обозначен буквами, а номер гармоники – цифрами [2]. Спектр нормирован к наиболее активной моде B1, которая расположена на 8–10% выше от основной моды C1.

Из-за низкого динамического сопротивления и близкого расположения побочной частоты затрудняется устойчивое возбуждение колебаний на частоте рабочего резонанса. Для подавления побочных колебаний применяют различные технические методы. Один из них – использование LC-контура, который настраивается на частоту рабочего резонанса, на нужную C-моду. Несмотря на то что использование LC-контура усложняет настройку кварцевого генератора, а также ухудшает температурную стабильность частоты, этот метод применяют многие производители кварцевых генераторов (как термостатированных, так и на базе резонатор-термостат).

Метод «динамической селекции» [3] основывается на замещении кварцевого резонатора эквивалентной электрической схемой, которая состоит из статической ёмкости C0 и параллельно подключенной цепи из динамических элементов: индуктивность Lq, ёмкость Cq, сопротивление Rq. Учитывая динамические параметры C-моды и B-моды, схему автогенератора рассчитывают таким образом, что при подаче питания скорость нарастания основного колебания C-моды превышает скорость нарастания колебания B-моды.

В кварцевых резонаторах, вне зависимости от количества углов поворота, типа среза кристалла, присутствуют сдвиги, скачки, а также провалы активности [3, 4]. На рис. 2 показаны типичные провалы активности в зависимости частоты от температуры. Падение активности представляет собой резкое увеличение динамического сопротивления кварцевого резонатора в температуре.

На графике представлены три кривые одного и того же резонатора. Кривая R_1, f_R отражает зависимость частоты от температуры с подключенным последовательным сопротивлением и без нагрузочного конденсатора. Кривые R_{L1}, f_{L1} и R_{L2}, f_{L2} отражают зависимость частоты от температуры с подключенным последовательно сопротивлением и различных нагрузочных ёмкостей.

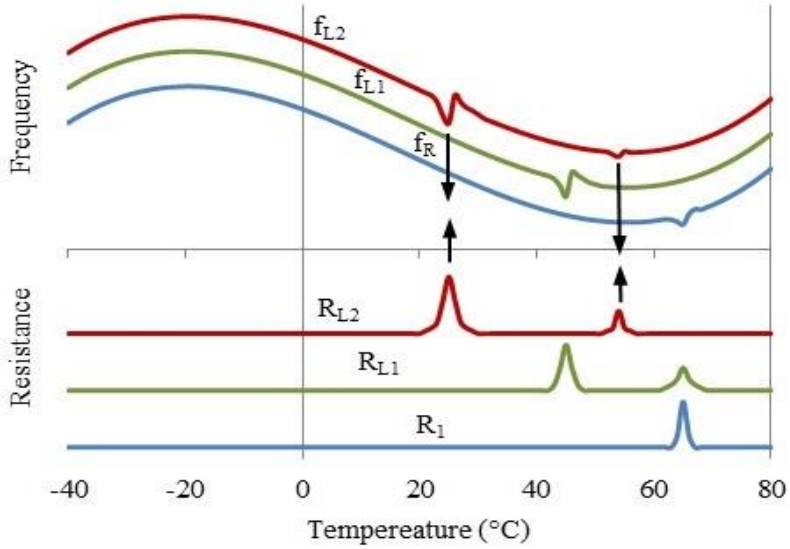


Рис. 2. Провалы активности кварцевого резонатора

Провалы активности обычно сильнее у низкочастотных резонаторов [5], работающих на основных гармониках. По данным разных источников [4, 5], провалы активности могут наблюдаться как в узких температурных диапазонах от 5 до 30 °С, так и в довольно широких – от 20 до 70 °С. Считается, что провалы активности вызваны мешающими механическими связями в кристалле кварца. Такие механические связи отбирают энергию от основных колебаний [4]. В работе [6] исследования с целью изучить причины провала моды В в узком температурном интервале велись для двухмодового кварцевого резонатора ТД-среза. Экспериментально было доказано, что причины провала побочного колебания связаны с акустическими взаимодействиями мод.

В результате можно сделать следующие выводы:

– все провалы активности отличаются от одного к другому кристаллу кварца и от схем включения кварцевого резонатора;

– старение кварцевого резонатора не оказывает на частотно-температурные формы провалов, и они стабильны во времени;

– провалы активности могут не быть обнаружены при стандартных процедурах проверки кварцевых генераторов;

– провалы активности могут привести к потере фазовой синхронизации и другим проблемам;

– необходимо выявлять резонаторы с провалами активности на стадии производства кварцевых генераторов.

–

III. Описание методики

При поиске провалов активности кварцевого резонатора применяются различные методы. Один из методов [6] заключается в использовании камеры миниатюрного термостата и технологического генератора частот. Миниатюрный термостат позволяет достаточно точно (с точностью лучше 0.1 °С) регулировать температуру статирования, что позволяет с высокой долей вероятности обнаружить провалы активности кварцевого резонатора. Такой метод пригоден только в экспериментальных целях, так как возможности использовать его в серийном производстве нет.

Другой метод заключается в использовании камеры тепла-холода с регулируемой скоростью изменения температуры 1.25 °С в минуту и лучше. Большинство установок не имеют такой функции, а если же имеют, то стоят очень дорого, и вопрос о поддержании температуры с высокой точностью в большом объёме остаётся открытым.

Анализ проблемы провалов активности кварца, изучение различных научных источников, статей, результатов экспериментов привели к разработке новой методики проверки и отбраковки кварцевых генераторов в серийном производстве.

Методика заключается в следующем: кварцевый генератор выдерживается в камере тепла-холода при температуре –60 °С, после чего на него кратковременно подаётся питание и впоследствии измеряется частота выходного сигнала. Такое кратковременное включение и выключение приводит к плавному нагреву пьезоэлемента.

Ниже на рис. 3 приведена структурная схема установки для обеспечения методики «холодного старта».

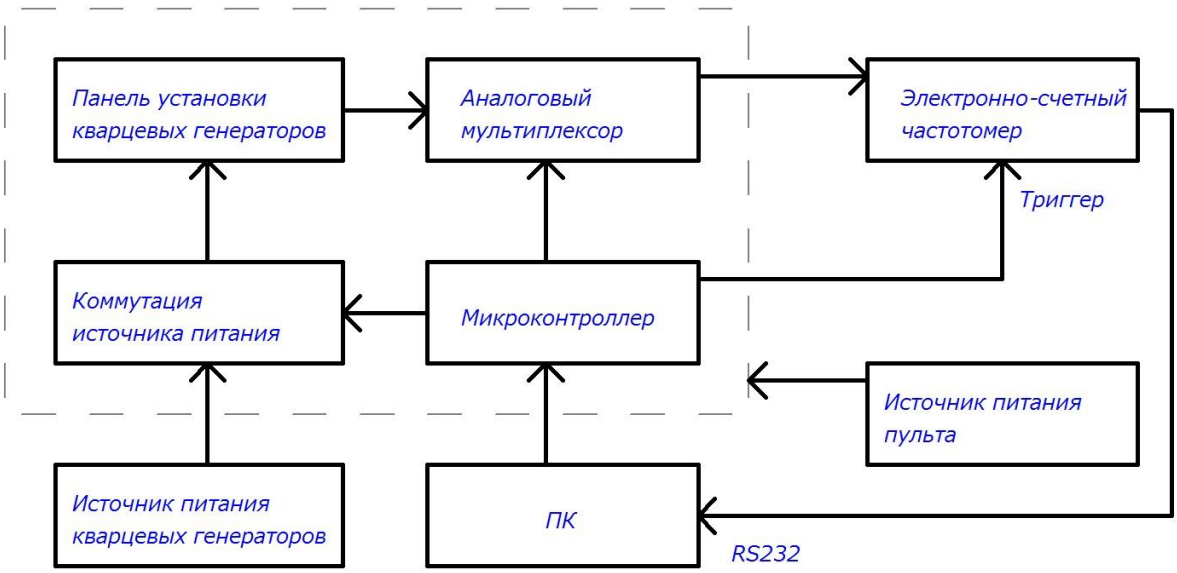


Рис. 3. Структурная схема установки «холодного старта»

Панель для установки кварцевых генераторов разрабатывается исходя из внутреннего объёма камеры тепла-холода. Пульт содержит панель для установки кварцевых генераторов, аналоговый мультиплексор для переключений выходов кварцевых генераторов на входной канал частотомера, коммутацию питания каждого генератора по отдельности и микроконтроллер.

Все настройки программы микроконтроллер получает от персонального компьютера с последующим управлением мультиплексором, коммутации питания кварцевых генераторов и частотомером для захвата в необходимый период времени выходного сигнала с генераторов. Частотомер по последовательному порту RS232 передаёт данные в персональный компьютер.

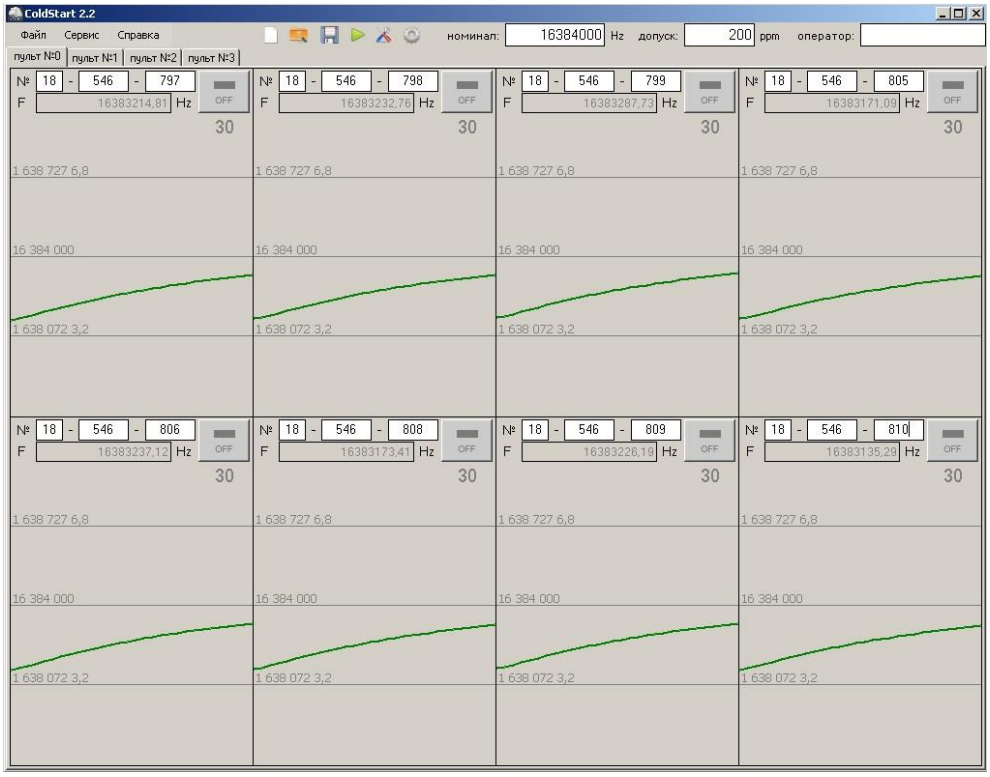


Рис. 4. Интерфейс программы «холодного старта»

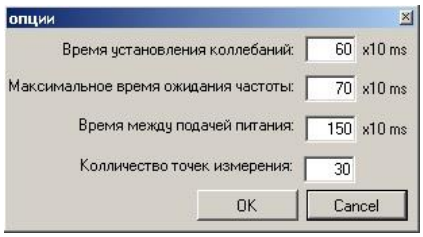


Рис. 5. Настройки программы «холодный старт»

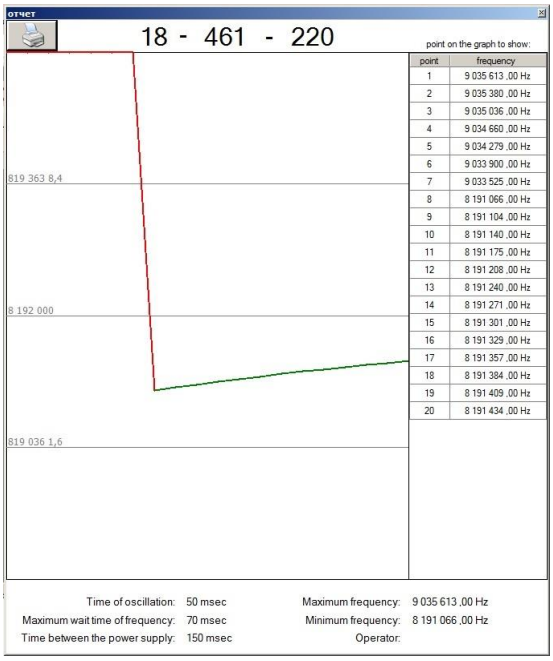


Рис. 6. Отображение отчёта

На рис. 6 содержится отчёт о работе кварцевого генератора. Такие отчёты о функционировании каждого протестированного изделия хранятся в базе, и при обнаружении провалов активности в большом количестве образцов из партии они подлежат дополнительному исследованию.

Из отчёта (рис. 6) видно, что кварцевый генератор работал на побочной B-моде с последующим перескоком на рабочую C-моду. Данный резонатор изготовлен из модифицированного SC-среза и работает на методе динамической селекции [3]. Исследуем его динамические параметры на C-моде и B-моде.

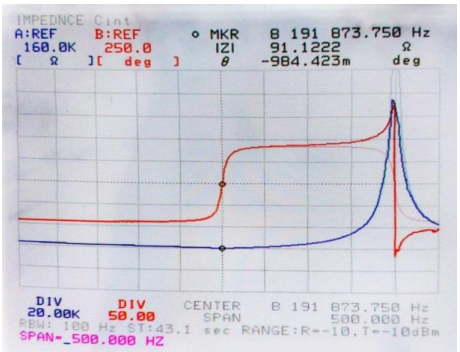


Рис. 7. Фазочастотная характеристика C-моды

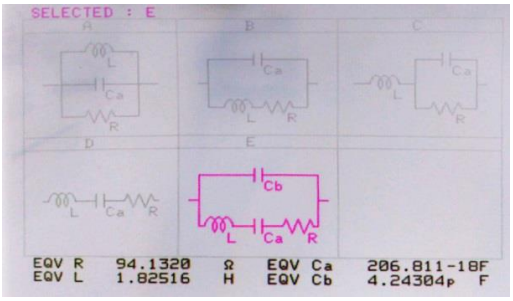


Рис. 8. Динамические параметры C-моды

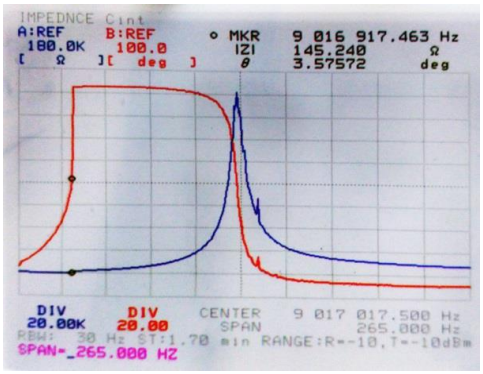


Рис. 9. Фазочастотная характеристика B-моды

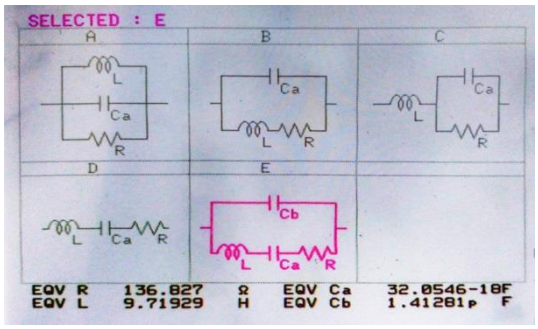


Рис. 10. Динамические параметры B-моды

Из параметров кварцевого резонатора видно, что его динамическое сопротивление побочной моды выше примерно в 1,5 раза, а динамическая индуктивность больше в пять раз. С такими параметрами побочной моды кварцевый генератор должен стабильно работать на основной моде.

IV. Заключение

Изучение проблем провалов активности кварцевых резонаторов привело к созданию методики отбраковки изделий в серийном производстве. Метод «холодного старта» показал, что динамическая селекция не даёт полной уверенности в стабильной работе кварцевого генератора. Метод LC-контура тоже не всегда является гарантом стабильной работы, особенно в конструкции кварцевого генератора на базе резонатора-термостата, так как автогенератор находится за пределами термостатирования и подвержен уходу параметров с изменением окружающей среды, что может привести к провалам активности.

Метод «холодного старта» уже не первый год успешно применяется при производстве кварцевых генераторов фирмы ООО «Мэджик Кристалл».

Список литературы

1. Кандыба П. Е., Поздняков П. Г. Пьезоэлектрические резонаторы. Справочник / Под ред. П. Г. Позднякова. М.: Радио и связь, 1992. 392 с.

2. John R. Vig. Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications – A Tutorial // 2004 IEEE International Frequency Control Symposium Tutorials, May 2004.

3. Abramzon I., Baranushkin S., Gubarev A., Rotova O., Tapkov V. High-stability miniature OCXOs based on advanced IHR technology // Proceedings of 2007 IEEE International Frequency Control Symposium. 2007. P. 242–245.

4. Activity Dips in Crystal Oscillators APPLICATION NOTE QTAN-102. URL: https://q-tech.com/wp-content/uploads/QTAN102-Activity-Dips-in-Crystal-Oscillators.pdf (дата обращения: 20.02.2019).

5. Ballato A., Tilton R. Electronic Activity Dip Measurement // IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, March 1978. Vol. IM-27, no. 1. P. 59–65.

6. Хоменко И. В., Лепетаев А. Н., Косых А. В. Исследование нестабильности динамического сопротивления B-моды двухмодового кварцевого резонатора ТД-среза в интервале температур // Омский научный вестник. 2005. № 3 (32). С. 157–161.

УДК 621.396

САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ СЕТЬ НИЗКОСКОРОСТНЫХ РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ КОРОТКИХ СООБЩЕНИЙ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

П. И. Пузырёв, М. А. Квачев, В. А. Ерохин
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе обоснована применимость средневолнового диапазона частот для организации связи в малонаселённых территориях Российской Федерации, не покрытым сетями сотовой связи. Показано, что низкоскоростной средневолновый модем передачи коротких сообщений может обеспечить передачу сообщений в радиусе до 200 км. Целью работы является разработка концепции самоорганизующейся Mesh-сети, построенной на основе низкоскоростных модемов, которая позволит значительно увеличить зону покрытия и достоверность доставки сообщения. Представлены выражения для расчёта метрик с целью выбора наикротчайшего пути, учитывающих количество ретрансляций и минимальное отношение сигнал/шум на всем протяжении маршрута. Представлен алгоритм построения сети.**

Ключевые слова: **самоорганизующаяся сеть, mesh-сеть, метрика, средневолновый диапазон.**

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-156-160

I. Введение

В настоящее время на большой части территории Российской Федерации по-прежнему отсутствует полное покрытия сотовыми сетями связи, особенно в приполярных территориях. И если для многих населённых пунктов эта проблема решена, то за пределами населённых пунктов единственным средством связи остаются наземная УКВ, КВ радиосвязь и спутниковая связь. Однако во многих случаях необходимо поддерживать связь с удалёнными объекта-

ми и группами, в том числе и мобильными группами спасателей, геологов и т.п. Ещё одним примером является передача метеорологической информации, извещений автономных охранных систем, сигналов радиомаяков, дифференциальных поправок навигационных систем и прочей информации небольшого объёма.

Дальность связи в УКВ диапазоне ограничены прямой видимостью, что составляет порядка 20-30 км, а при низком расположении антенн приёмного и передающего устройств может составлять единиц километров. По этой причине сплошное покрытие сетями сотовой связи в районах с малой плотностью населения является нецелесообразным по экономическим и практическим соображениям. Радиосвязь в КВ диапазоне сильно зависит от состояния ионосферы. Прохождение сигнала является непредсказуемым на практических территориях. Для спутниковой связи и передачи данных доступны несколько спутниковых систем: Инмарсат (Великобритания), Иридиум (США), Аргос (Франция), Гонец (РФ), Глобалстар (США), Орбкомм (США) [1]. Спутники «Глобалстар» имеют наклонение орбиты 52 градуса, что не позволяет их использовать на приполярной территории. Спутники «Инмарсат» располагаются на геостационарной орбите и обеспечивают зону покрытия только до 70° северной и южной широты. Этого достаточно для охвата большей части суши, но не полностью охватывает акваторию Северного морского пути. Ограниченность зоны покрытия в приполярных зонах некоторых спутниковых группировок и подконтрольность владеющих компаний странам НАТО, становится ограничением для широкого внедрения на территории РФ. Сюда же следует добавить высокую стоимость услуг для всех операторов спутниковой связи.

В перспективе, доступность к средствам связи и интернету будет увеличиваться для всей территории планеты, как посредством спутниковых технологий связи, так и, возможно, посредством стратостатов. Успешные испытания наземной связи через стратостаты в рамках проекта Loon уже были успешно проведены. Так в мае 2017г. в разрушенном ураганом «Мария» Пуэрто-Рико удалось восстановить доступ к интернету посредством стратостатов Loon.

На сегодняшний день стратостатная связь в России не рассматривается как альтернатива спутниковым и сотовым системам, а расширение спутниковой группировки является крайне дорогостоящим проектом. Тем не менее, уже на сегодняшний день существует технические средства и возможности, способные в короткие сроки обеспечить связью на малонаселённых территориях в радиусе до 200 км от радиостанции. Таковым является радиосвязь в средневолновом диапазоне. Средневолновый диапазон характеризуется приземным загоризонтным распространением радиоволн, что позволяет обеспечить связью объекты, находящиеся вне прямой видимости. К тому же в ближней зоне СВ диапазон не подвержен искажениям сигнала от многолучевого распространения при отражении от ионосферы.

Недостатком СВ диапазона, является необходимость использования сильно укороченных антенн для носимых и возимых радиостанций, что значительно ухудшает эффективность антенны. Также из-за особенностей согласования сильно укороченных антенн на штыре при передаче оказывается высокое напряжение в несколько киловольт при мощности всего в 100 Вт, что ограничивает применимость таких антенн при бо́льших мощностях. Также на распространение радиоволн влияет подстилающая поверхность, и мёрзлая и заснеженная почва увеличивает ослабление радиоволн, уменьшая дальность связи.

Решение проблемы сниженной эффективности антенны и ослабления сигнала мёрзлой почвой является применение низкоскоростных режимов передачи коротких сообщений. Несколько возможных реализаций низкоскоростного средневолнового модема были разработаны в ОмГТУ, позволяющих обеспечить передачу данных при отношении сигнал/шум до -20 дБ [3] (с/ш нормировано относительно полосы 2500Гц). Были получены и исследованы ансамбли ортогональных сигналов с дополнительной относительной фазовой манипуляцией, обладающая большей спектральной и энергетической эффективностью по сравнению с обычными ортогональными сигналами [4], [5]. Дополнительно повысить дальность и надёжность связи можно путём организации Mesh-сети из приёмопередающих устройств, обеспечивающих ретрансляцию сообщений от источника к получателю. Сложность реализации самоорганизующейся Mesh-сети заключается в низкой скорости передачи данных приёмопередающими устройствами, и как следствие незначительный объем передаваемой информации.

II. Постановка задачи

Самоорганизующаяся mesh-сеть характеризуется гибкой маршрутизацией сообщения, где каждое устройство способно ретранслировать передаваемые сообщения. Топология сети не является жесткой, и если одно из ретранслируемых устройств перестает работать, то маршрут перестраивается с учетом оставшихся ретранслируемых устройств [6], [7].

Так как протокол маршрутизации должен учитывать характер сообщений рассмотрим основные типы передаваемых сообщений. По характеристики организации групп:

1. Индивидуальные сообщения – один абонент передает сообщению другому одному абоненту.

2. Групповые сообщения – один абонент передает некоторой заранее определенной группе абонентов.
3. Широковещательные сообщения – передается всем абонентам.
4. Текстовое сообщения для абонента сотовой сети (SMS).
5. Текстовое сообщение для абонента сети Internet.

По характеристике типа сообщения:

1. Бедственные сообщения – имеют наивысший приоритет, должны содержать координаты отправителя и краткую информацию о ситуации.
2. Сообщения общего типа – текущий обмен сообщениями между абонентами.
3. Подтверждение приема сообщения – отправляется в ответ на принятое сообщение.
4. Служебные сообщения для построения сетевого маршрута.

Сеть состоит как из автономных приемо-передающих радиоустройств (РУ), так и базовых станций (БС), являющимися шлюзами между средневолновой радиосетью и сетями общего пользования: сотовая связь и Internet (рис. 1). Стрелками обозначены возможность установления соединения по радиоканалу.

Рассмотрим возможные пути передачи сообщения от абонента № 2 к абоненту № 10. Всех возможных комбинаций маршрута посредством ретрансляции радиоустройствами множество, однако, наикратчайших всего три: (2 – 5 – 8 – 9 – 10), (2 – 5 – 8 – 9 – 10), (2 – 5 – 6 – 7 – 10). Данные маршруты имеют три ретрансляции. Однако существует маршрут, обеспечивающий всего одну ретрансляцию – это маршрут РУ2 – БС1 – БС2 – РУ10. Так как базовые станции имеют доступ к сетям общего доступа, то передача сообщений между БС не требует ретрансляции по радиоканалу, время передачи данных может быть пренебрежимо мало по сравнению с низкоскоростной передачей данных по радиоканалу, а достоверность доставки сообщений является близкой к 100%.

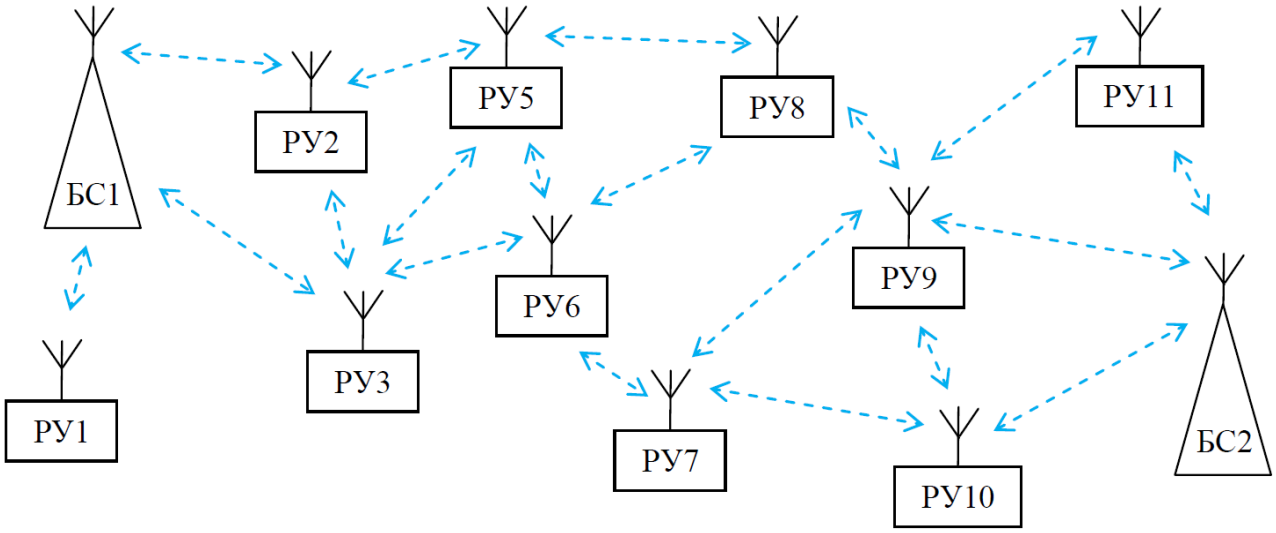


Рис. 1. Топология самоорганизующейся Mesh-сети

Выбор того или иного маршрута должен выполнятся на основании некоторой метрики, являющейся численным выражением надежности маршрута. В качестве такой метрики могут выступать количество ретрансляций, вероятность битовой ошибки, уровень принятого сигнала (RSSI), отношение сигнал/шум принятого сигнала, комбинация данных параметров и т.п.

III. Теория

Учитывая небольшой объем передаваемой информации и низкую скорость передачи, в качестве метрики не подходит оценка вероятности битовой ошибки, т. к. накопление статистики потребовало бы чрезмерного большого времени. Уровень принятого сигнала (RSSI) только косвенно позволяет оценить качество принятого сигнала, т.к. не учитывает мощность помехи. Поэтому в качестве используемой метрики предлагается использовать комбинацию количества ретрансляций и отношение сигнал/шум. При этом следует отметить, что также имеется контроль достоверности передаваемого сообщения в виде контрольной суммы сообщения, что также должно учитываться.

Допустим такую топологию сети, при которой каждое РУ может передать любому другому РУ сообщение как через радио ретрансляцию, так и через БС. В этом случае каждое РУ должно хранить журнал метрик всех возможных маршрутов. Однако, учитывая небольшой объем передаваемых данных и низкую скорость передачи составление журнала в процессе построения сети потребовало бы слишком большого времени, не целесообразного для практического применения. В этом случае более выгодным вариантом является составление журнала метрик только для соседних РУ, с которыми есть прямая радиосвязь, и метрик маршрутов до БС. В этом случае, если получателя сообщения нет среди соседних РУ, то обмен будет выполняться через БС. Составление метрик других маршрутов будет вестись уже в ходе текущего обмена сообщениями между абонентами и как только у источника сообщения появится информация о более коротком маршруте до получателя, он будет использовать его.

Выделим три типа метрик: локальная d_L, метрика глобального маршрута d_G и метрика альтернативного маршрута d_A. Локальная метрика содержит в себе информацию о качестве канала связи только с соседними радиоустройствами, т.е. учитывает только соотношение сигнал/шум. Локальные метрики хранит каждое РУ. Метрика глобального маршрута является характеристикой маршрута от какого-либо РУ до базовой станции, и учитывает все локальные метрики на пути и количество ретрансляций. Локальная и глобальная метрики вычисляются во время процедуры вхождения в сеть, после чего обновляются в ходе текущего обмена сообщениями. Метрика альтернативного маршрута получается в только ходе текущего обмена сообщениям и определяет качество маршрута от источника к получателю по любому возможному пути.

Локальная метрика определяется:

$$d_L = \begin{cases} 1, \quad SNR < SNR_{\min} \\ \dfrac{|SNR| - |SNR_{\max}|}{|SNR_{\min}| - |SNR_{\max}|}, \; SNR_{\min} \le SNR < SNR_{\max} \\ 0, \quad SNR \ge SNR_{\max} \end{cases} \tag{1}$$

где SNR – отношение сигнал/шум для принятого сигнала в дБ, $SNR_{\min}$ – чувствительность приемного устройства в дБ, $SNR_{\max}$ – отношение сигнал/шум, при котором обеспечивается гарантированный прием. На практике $SNR_{\max}$ можно считать больше $SNR_{\min}$ на 20 – 30 дБ.

Метрика глобального пути определяется согласно выражению:

$$d_G = N + K \cdot \max\{d_L\}, \tag{2}$$

где N – количество ретрансляций, K – коэффициент, определяющий достоверность доставки сообщения, принимающий значение больше единицы. Метрика глобального пути в большей степени определяется количеством ретрансляций и в меньшей степени отношением сигнал шум. В этом случае минимизируется время доставки сообщений. Если количество ретрансляций будет одинаково, то маршрут будет выбираться исходя из минимального SNR на всем маршруте. Чтобы избежать ситуации, при котором выбирается маршрут с меньшим количеством ретрансляций, но работающий на грани чувствительности в пользу маршрута с большим количеством ретрансляций, но более надежным радиоканалом, коэффициент K должен быть увеличен до значения, при котором обеспечивается выбор маршрута с гарантированной доставкой сообщения.

Метрика альтернативного пути рассчитывается аналогичным методом, как и метрика глобального пути, за исключением того, что данные для вычисления метрики получаются в ходе текущего обмена сообщениями.

Выбор маршрута производится путем сравнения всех возможных путем от источника сообщения к получателю. Путь, имеющий наименьшую метрику, выбирается в качестве маршрута.

Построение сети инициирует базовая станция, которая отправляет запрос на предоставление информации о наличии РУ в зоне покрытия. РУ в ответ на запрос отправляют подтверждение о принятом сообщении. Далее БС отправляет широковещательное сообщение о доступных РУ, содержащее метрики. Если РУ, которое приняло запрос, но не получило подтверждение в широковещательном сообщении от БС, повторяет попытку связи с БС. Радиоустройства, находящиеся в зоне покрытия БС образуют первое кольцо. РУ, находящиеся в зоне покрытия РУ первого кольца, образуют второе кольцо, и т.д.

Для минимизации возможных коллизий, когда несколько РУ одновременно начинают излучать в эфир в процессе построения сети, необходимо разнести их во времени и также желательно по частоте. Время начало излучения в эфир выбирается случайным образом из диапазона допустимых значений. В этом случае, даже если в первый сеанс произошла коллизия, то далее в силу случайности времени начала передачи, сообщения будут разнесены во времени. Также следует поступить с частотным разнесением, если таковое возможно.

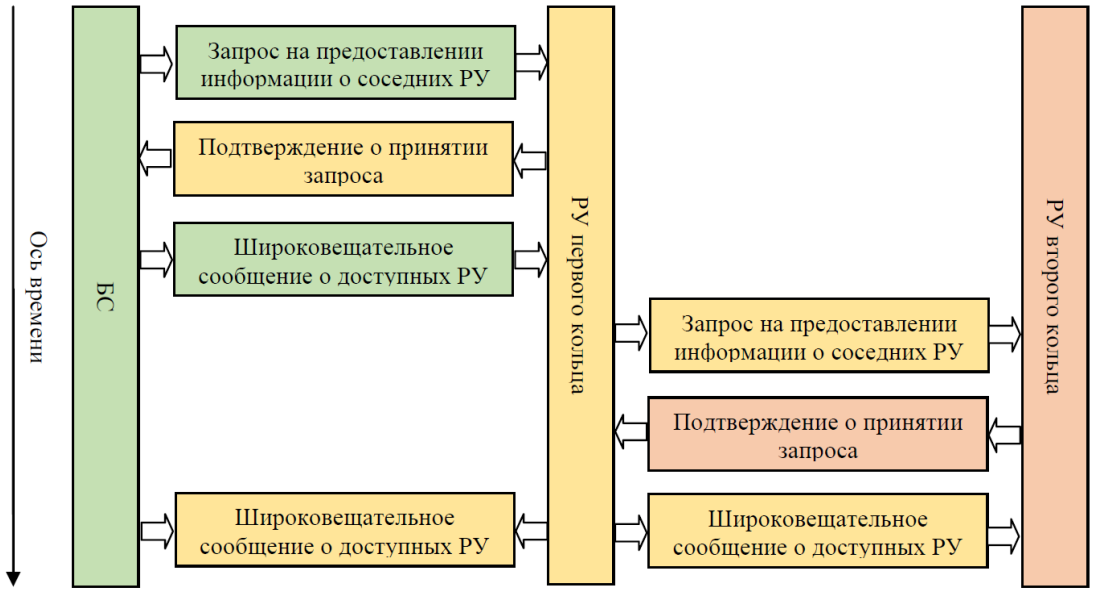


Рис. 2. Протокол построения Mesh-сети

Каждое РУ анализирует принятые метрики и сигнал/шум, и, основываясь на этом, составляет журнал, в соответствии с которым будет выбирать маршрут следования сообщения.

VI. Выводы и заключение

Описанный протокол маршрутизации сообщений позволяет повысить достоверность доставки сообщения, даже если источник и получатель находятся вне зоны покрытия друг друга. Расчет метрик позволяет минимизировать время доставки сообщения за счет минимизации количества ретрансляций. Дополнительное введения коэффициента *K* в расчёт метрики глобального пути (2) позволяет избежать ситуации построения ненадежного маршрута, при котором хотя бы одно из РУ работает на пределе чувствительности. Каждое РУ имеет информацию о своих соседях и всех возможных путях до БС с метриками. В процессе текущего обмена сообщениями может появляться информация об альтернативных путях между двумя РУ без использования БС.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 17-79-10047.

Список литературы

1. Маринич А. Н., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М. Мониторинг судов на трассах северного морского пути с помощью спутниковых систем связи // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2016. № 6 (40). С. 184–205.
2. Копиев Г. Стратостаты Project Loon восстановили интернет ста тысячам жителей Пуэрто-Рико. URL: https://nplus1.ru/news/2017/11/10/loon (дата обращения: 07.03.2019).
3. Пузырев П. И., Ерохин В. В., Шеин В. Ю., Завьялов С. А. Низкоскоростной модем для передачи данных малого объема в средневолновом диапазоне частот для территории Арктики // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 145–150.
4. Puzyrev P. I. Multiple Frequency-Shift Keying with Differential Phase-Shift Keying of Subcarriers // Far East Journal of Electronics and Communications. 2018. Vol. 18, no. 6. P. 829–840.
5. Puzyrev P. I. Orthogonal Phase-Coded Signals with Additional Differential Phase Shift Keying // Conference: 2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, 2018. 6 p. DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601442.
6. Метелёв А. П. Чистяков А. В., Жолобов А. Н. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1 (3). С. 75–78.
7. Голдсмит А., Медар М., Эффрос М. Самоорганизующиеся беспроводные сети // В мире науки. 2010. № 6. С. 77–81.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ. НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 665.6-403.3,544.478-03

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЦЕОЛИТА ZSM-5 ЩЕЛОЧАМИ И СОЕДИНЕНИЯМИ ФОСФОРА ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО АКТИВНОСТИ В РЕАКЦИЯХ ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА ПРИ КРЕКИНГЕ СПИРТОВ

Е. О. Алтынкович[1], К. С. Плехова[2], О. В. Потапенко[2], Т. П. Сорокина[2], В. П. Доронин[2]

[1]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*
[2]*Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, г. Омск, Россия*

Аннотация. **В работе исследованы способы изменения активности цеолита типа ZSM-5 в реакциях переноса водорода при крекинге низших алифатических спиртов: щелочная обработка цеолита; модифицирование цеолита фосфором. Влияние щелочной обработки и модифицирования фосфором изучалось на цеолите ZSM-5 с модулем 30 с мольным отношением $NaOH:SiO_2$ = 230 и содержанием фосфора 8 % масс. Щелочная обработка цеолита приводит к снижению модуля цеолита и росту коэффициента переноса водорода при превращении алифатических спиртов. Модифицирование цеолита фосфором эквивалентно повышению модуля цеолита, что приводит к уменьшению коэффициента переноса водорода.**

Ключевые слова: ZSM-5, одноатомные спирты, щелочная обработка, модифицирование фосфором, перенос водорода.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-161-164

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все чаще появляются сообщения об истощении запасов нефти. В качестве альтернативного источника сырья для удовлетворения нужд нефтехимической промышленности могут выступать алифатические спирты. Они могут быть получены при переработке растительного сырья или, в частности метанол, получены из синтез-газа [1].

По видам направлений переработки можно говорить об универсальности спиртов как сырья. В зависимости от параметров процесса используемых катализаторов из спиртов можно получать легкие олефины, углеводороды бензинового ряда, а также ароматические углеводороды [2, 3, 4].

Основным активным компонентом катализатора для процессов переработки спиртов служит цеолит типа ZSM-5. Значительное влияние на состав и распределение получаемых продуктов оказывает модуль цеолита (SiO_2/Al_2O_3). При росте модуля снижается количество кислотных центров, что положительно сказывается на селективности катализатора к легким олефинам. В то же время, при уменьшении модуля цеолита, растет его кислотность, что позволяет получать высокий выход ароматических углеводородов, когда это необходимо. [5].

Многие исследователи неоднократно отмечали, что модифицирование цеолита ZSM-5 фосфором существенно увеличивает выходы алкенов C_2-C_4 за счет частичной нейтрализации фосфором кислотных центров [6]. Для увеличения выхода парафиновых и ароматических углеводородов применяют щелочную обработку цеолита, которая приводит к росту концентрации кислотных центров и, следовательно, к увеличению вклада реакций переноса водорода [7].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель работы: исследовать изменение физико-химических свойств цеолита ZSM-5, эквивалентные изменению модуля, при обработке щелочью и модифицировании фосфором, а также выявить закономерности изменения активности полученных катализаторов в реакциях крекинга и переноса водорода при превращении 3-метилбутанола-1.

III. ТЕОРИЯ

Исходные реактивы

В качестве исходного активного компонента катализатора щелочной обработки и модифицирования фосфором использовали цеолит типа ZSM-5 (Zeolyst International, CBV 3024E) с модулем 30 без дополнительной обработки. В состав матрицы катализатора входили бентонитовая глина и оксид алюминия.

Щелочная обработка

Обработка цеолита щелочью происходила по следующей схеме. В коническую колбу к навеске исходного цеолита приливали раствор щелочи (NaOH) с концентрацией 0.2 н и температурой 60 °С. Был получен образец с мольным отношением $NaOH:SiO_2$ равным 230. После обработки цеолит промывали дистиллированной водой, проводили серию ионных обменов нитратом аммония с целью снижения содержания натри в готовом цеолите. Далее цеолит сушили при комнатной температуре на воздухе, при 100 °С в течение 10 ч и прокаливали в муфельной печи при 600 °С в течение 5 ч.

Нанесение фосфора

Получение цеолита, модифицированного фосфором, осуществляли путем пропитки цеолита HZSM-5 (с модулем 30) раствором дигидрофосфата аммония. Затем пропитанный цеолит отделяли от маточного раствора, сушили сутки на воздухе при комнатной температуре, затем при 100 °С в течение 10 ч, прокаливали при 600°С в течение 5 ч. В результате был получен образец с содержанием фосфора в цеолите 8.0 % масс.

Приготовление катализатора

Полученный цеолит смешивался с компонентами матрицы, оксидом алюминия и бентонитовой глиной в соотношении 2:1:1, до получения водной гомогенной суспензии. Затем суспензию отфильтровывали от воды, а полученную пасту отправляли на формовку в экструдер. Далее катализатор сушили при комнатной температуре, при 100 °С и прокаливали в муфельной печи при 600 °С.

Эксперименты по изучению каталитических свойств цеолитов проводили на лабораторной установке с неподвижным слоем катализатора. Катализатор в количестве 3 г загружали в реактор. Температура процесса во всех экспериментах составляла 450°С и WHSV – 2.5 $ч^{-1}$. В качестве характеристики переноса водорода использован коэффициент переноса водорода (hydrogen transfer coefficient, HTC), рассчитываемый как отношение выходов насыщенных и ненасыщенных C_4-углеводородов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ТАБЛИЦА 1
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕОЛИТОВ

Параметр	ZSM-5	ZSM-5(NaOH)	P-ZSM-5
Количество десорб. аммиака. мкмоль/г.	1188	1948	347
Площадь поверхности БЭТ, $м^2/г$	416	596	112
Площадь микропор t-Plot, $м^2/г$	365	550	102
Объем микропор, $см^3/г$	0.154	0.211	0.040
Общий объем пор, $см^3/г$	0.217	0.307	0.087
Средний диаметр пор, нм	2.15	2.06	3.1

После щелочной обработки наблюдается увеличение площади поверхности цеолита с 416 до 596 $м^2/г$ (табл. 1). Также происходит повышение общего объема пор и микропор. Это связано с частичным разрушением структуры цеолита и образованием новых микропор и мезопористой структуры. Модифицирование цеолита фосфором наоборот приводит к снижению площади поверхности до 112 $м^2/г$, а также к уменьшению общего объема пор цеолита и микропор до 0.087 и 0.040 $см^3/г$ соответственно. Данные явления вызваны образованием полифосфатов, которые приводят к частичной блокировке пор цеолита [8]. Данные анализа ТПД-NH_3 образцов показали, что обработка щелочью приводит к росту кислотности цеолита до 1948 мкмоль/г. В то же время кислотность цеолита P-ZSM-5 уменьшилась до 347 мкмоль/г. Фосфор встраивается в структуру цеолита с образованием иона $P(OH)^{4+}$. После прокалки фосфор образует поли- и пирофосфаты, тем самым нейтрализуя кислотные центры [9].

Влияние щелочной обработки цеолитов в превращении 3-метилбутанола-1 изучалось при температуре 450 °С и WHSV = 2.5 $ч^{-1}$. Распределение и выходы продуктов представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 2
СОСТАВ ПРОДУКТОВ ПРЕВРАЩЕНИЯ 3-МЕТИЛБУТАНОЛА-1
НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕОЛИТАХ

Выход, % на углеводородную часть	ZSM-5	ZSM-5(NaOH)	P-ZSM-5
Алканы C_1-C_4	61.4	58.3	31.8
Олефины C_2-C_4	4.7	1.5	32.2
Жидкие у/в (в том числе C_5)	30.9	29.8	33.0
Кокс	3.0	10.4	3.0
$НТС_4$	**15.7**	**60.8**	**1.4**
Арены	**23.2**	**22.5**	**11.1**
Состав жидких продуктов, %			
н-парафины	0.2	0.6	2.1
и-парафины	0.9	3.2	4.0
олефины	0.7	0.2	16.0
нафтены	1.0	0.5	13.6
арены	96.9	95.5	64.3

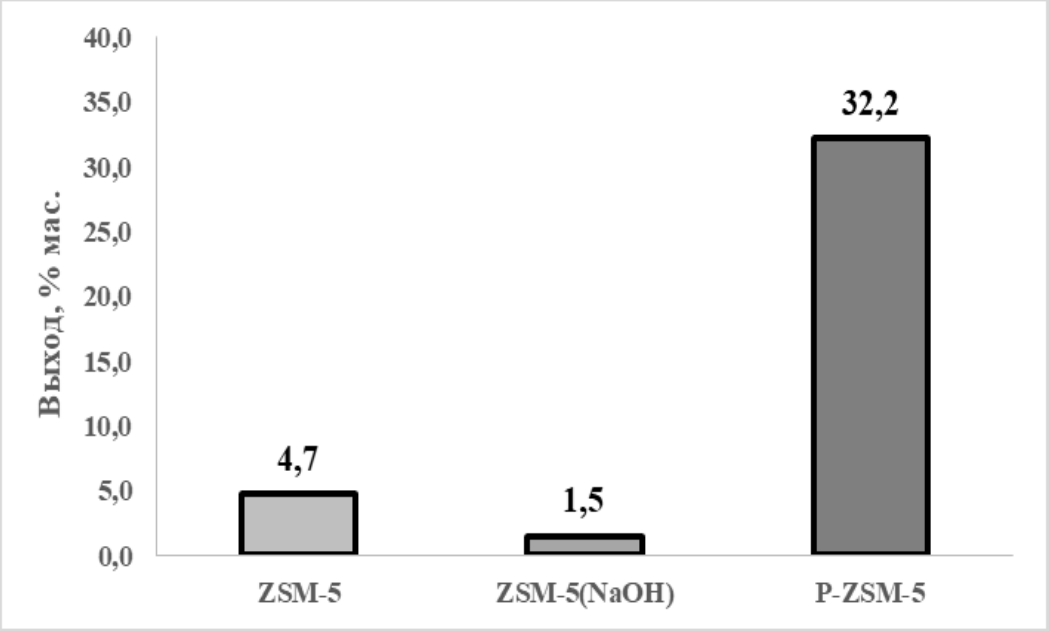


Рис. 1. Выход олефинов C_2-C_4 на модифицированных цеолитах

Наибольший выход олефинов C_2-C_4 – при крекинге 3-метилбутанола-1 был получен на образце, содержащем фосфор – 32.2 % (рис. 1). В то же время на этом образце коэффициент переноса водорода значительно ниже, чем на других образцах 1, 4 (рис. 2). Низкая кислотность цеолита препятствует насыщению олефинов в реакциях переноса водорода, на что также указывает низкий выход алканов 31.8 %. Образец, прошедший щелочную обработку имеет самый высокий коэффициент переноса водорода 60,8 и самый низкий выход легких олефинов 1,5 %. Жидкий продукт немодифицированного и обработанного щелочью цеолита представлен в основном ароматическими углеводородами. Однако, абсолютный выход ароматических углеводородов и их относительно содержание в жидком продукте образца ZSM-5 (NaOH) меньше по сравнению с немодифицированным образцом. Причина данного явления – частичная конденсация ароматических углеводородов в коксовые отложения, выход которых составил 10,4 %. Жидкий продукт, полученный на цеолите P-ZSM-5, кроме ароматических углеводородов, содержит в значительной степени нафтены и олефины, что указывает на снижение реакций переноса водорода.

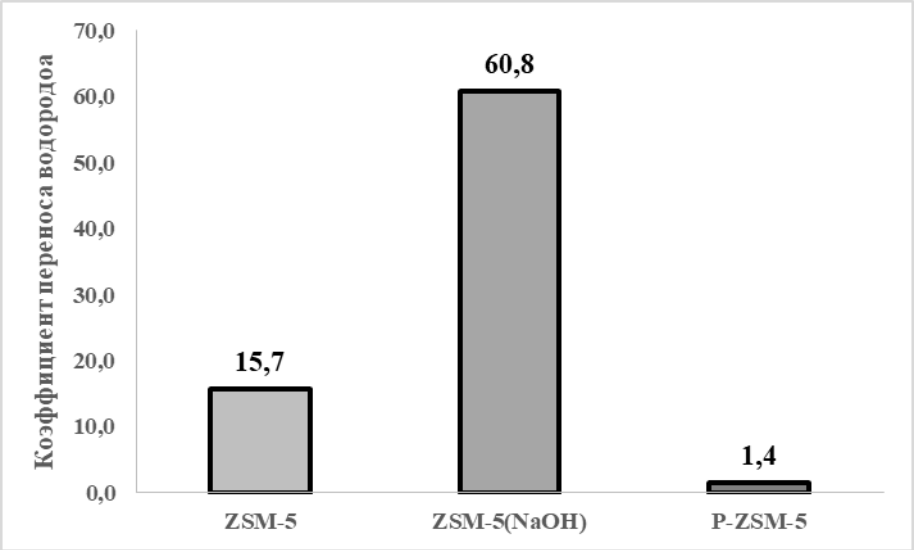


Рис. 2. Коэффициент переноса водорода на катализаторах на основе цеолита ZSM-5

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были изучены физико-химические и каталитические свойства цеолитов, прошедших щелочную обработку и модифицирование фосфором, и катализаторов на их основе.

Обработка щелочью приводит к образованию дополнительного объема микро- и мезопор. Рост кислотности обработанных NaOH цеолитов приводит к увеличению коэффициента переноса водорода, что эквивалентно снижению модуля цеолита.

При модифицировании цеолита фосфором происходит снижение общего объема пор, объема микропор и площади поверхности. Уменьшение кислотности цеолита приводит к низкому значению коэффициенту переноса водорода. Таким образом, модифицирование фосфором сравнимо с ростом модуля цеолита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Гуляевой Т.И., Талзи В.П., Евдокимову С.Н., Измайлову Р.Р. и Бабенко А.В. за помощь при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bjørgen M., Joensen F, Holm M.S., Olsbye U., Lillerud K-P., Svelle S. Methanol to gasoline over zeolite H-ZSM-5: improved catalyst performance by treatment with naoh // Applied Catalysis A: General. 2008. T. 345, no. 1. P. 43–50.
2. Mores D., Stavitski E., Kox M., Kornatowski J., Olsbye U., Weckhuysen B. M. // Chem. Eur. J. 2008. No. 14. P. 11320.
3. Ilias S., Bhan A. // Journal of Catalysis 2012. No. 290. P. 186.
4. Ji H., Zhang Q., Wang B., Li C., Shan H. // Catal. Lett. 2014. No. 144. P. 1860.
5. Liu J., Zhang C., Shen Z., Hua W., Tang Y., Shen W., Yue Y., Xu H. // Catalysis Communications . 2009. No.10. P. 1506.
6. Yaripour F., Shariatinia Z., Sahebdelfar S., Irandoukht A. // Microporous and Mesoporous Materials. 2015. No. 203. P. 41.
7. Yingping H., Min L., Chengyi D., Shutao X., Yingxu W., Zhongmin L., Xinwen G. // Chinese Journal of Catalysis. 2013. No. 34. P. 1148.
8. Liua D., Choi W.C., Leea C.W., Kanga N.Y., Leea Y.J., Shinc C-H., Park Y.K. // Catalysis Today. 2011. No. 164. P. 154.
9. Takahashi A., Xia W., Nakamura I., Shimada H., Fujitani T. // Applied Catalysis A: General. 2012. No. 423–424. P. 162.

УДК 54.057 + 546.06

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПЛОХООКРИСТАЛЛИЗОВАННОГО АПАТИТА, ГИДРОСИЛИКАТА КАЛЬЦИЯ И КАЛЬЦИТА, ПОЛУЧЕННЫЕ ОСАЖДЕНИЕМ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

А. П. Солоненко[1], А. И. Блесман[2], Д. А. Полонянкин[2]
[1]*Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия*
[2]*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

Аннотация. **Фосфаты, карбонаты и силикаты кальция входят в состав ряда медицинских материалов, предназначенных для восстановления целостности костной ткани. Как правило, основным компонентом таких препаратов является одна из названных солей. Ввиду различия свойств данных соединений представляет интерес получение их смесей, поскольку в этом случае свойства материала могут быть скорректированы при изменении пропорций компонентов. В данной работе изучена возможность синтеза композитов нанокристаллических фосфатов, силикатов и карбонатов кальция осаждением в водном растворе. Твердые фазы, образовавшиеся в открытой системе $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - Na_2SiO_3 - H_2O, изучены с применением группы физико-химических методов. Данные элементного анализа, РФА и ИК-Фурье-спектроскопии указывают на то, что в исследуемых средах совместно осаждаются плохоокристаллизованный апатит, гидросиликат кальция и кальцит, кристаллиты которых образуют нанокомпозиты.**

Ключевые слова: синтез, поликомпонентные материалы, гидроксиапатит, гидросиликаты кальция, кальцит.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-165-169

I. Введение

Вещества в нанокристаллическом состоянии могут быть получены различными способами, основанными на определенных физических явлениях или химических превращениях [1]. Последние лежат в основе метода осаждения малорастворимых соединений в растворах. В данном случае целевое вещество образуется в результате взаимодействия исходных реагентов и выделяется при переводе гетерогенной системы из коллоидного состояния в дисперсное твердое. Возможность варьирования таких условий синтеза, как pH раствора, температура, скорость и порядок смешения компонентов, интенсивность перемешивания, время старения осадка, позволяет получать материалы с заданными характеристиками. Параметры процесса могут оказывать влияние на морфологию веществ, их дисперсность, строение кристаллической решетки, степень гидратации и приводить к формированию аморфных или кристаллических тел. Также при изменении состава системы, в которой протекает процесс образования новой фазы, возможен синтез соединений различной стехиометрии, содержащих ионные примеси или смешанных с другой фазой, введенной в реакционную среду или образовавшейся вместе с основным продуктом. В последнем случае осадок будет представлять собой композит из нескольких малорастворимых соединений. Их пропорции в образце также могут варьировать в зависимости от условий эксперимента.

Создание подобных поликомпонентных материалов на основе плохоокристаллизованных веществ в нанокристаллическом состоянии представляет интерес для медицины, в частности для инженерии костной ткани. Это связано с тем, что твердые ткани тела человека также представляют собой композит гидроксиапатита с различными ионными замещениями и коллагена [2]. Кроме этого, в большинстве случаев монофазные препараты не обеспечивают эффективного восстановления дефекта ввиду либо слишком быстрой, либо слишком медленной их резорбции при контакте с биологическими жидкостями. Сочетание нескольких веществ дает возможность модифицировать биоактивность и механические свойства материалов. Этим же целям служит стремление к уменьшению размеров частиц до наноуровня и переходу к аморфному состоянию.

В литературе освещаются, главным образом, способы получения кристаллических форм веществ и их смесей. Так, большое внимание уделяется композитам, включающим фосфаты кальция (ФК) различной стехиометрии [3]. Однако, свойством биоактивности обладает также ряд других соединений кальция. В их числе карбонаты и силикаты кальция. По сравнению с ФК они обладают более высокой растворимостью. Ионы Ca^{2+}, выделяющиеся в окружающую среду в результате резорбции солей, способны вовлекаться в процессы биоминералообразования и стимулировать формирование новой костной ткани. Таким образом, актуальна разработка простых методов синтеза смесей нанокристаллических фосфатов, силикатов и карбонатов кальция. Представляется возможным получение данных композитов методом осаждения из водных растворов.

Теоретическое исследование процессов фазообразования в открытых системах $Ca(NO_3)_2$ - $(NH_4)_2HPO_4$ - Na_2SiO_3 - H_2O, выполненное ранее [4], позволило установить, что в щелочных водных растворах, содержащих ионы Ca^{2+}, PO_4^{3-}, SiO_3^{2-} и CO_3^{2-} (появляющихся в среде в результате поглощения CO_2 из воздуха), величины энергии Гиббса кристаллизации гидроксиапатита, силиката кальция и кальцита имеют близкие значения. Осаждение смеси солей термодинамически вероятно в системах данного ионного состава.

В настоящей статье представлены результаты исследования твердых фаз, полученных осаждением в открытых водных щелочных системах, содержащих ионы Ca^{2+}, PO_4^{3-} и SiO_3^{2-}.

II. Постановка задачи

Основная задача данной работы заключается в изучении с применением группы физико-химических методов состава твердой фазы, формирование которой происходит в открытой системе $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - Na_2SiO_3 - H_2O, и экспериментальное определение возможности синтеза в заданных условиях смесей нанокристаллических фосфатов, силикатов и карбонатов кальция.

III. Теория

Для исследования выбрана система $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - Na_2SiO_3 - H_2O. Различные ее вариации, рассчитанные для получения смесей с варьируемым содержанием фосфатов и силикатов кальция (от 0 до 100 мас.% каждого компонента), готовили путем смешения растворов реагентов заданной концентрации (табл. 1). Полученные реакционные среды содержали ионы Ca^{2+}, PO_4^{3-}, SiO_3^{2-}, H+/OH-, а также CO_3^{2-}, появляющиеся в результате поглощения CO_2 из воздуха. pH систем корректировали при помощи растворов 20% NaOH или 5M HCl до значения 12.00 ± 0.05. Также выполняли контрольные эксперименты по осаждению твердой фазы в системах $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - H_2O и $Ca(OH)_2$ - Na_2SiO_3 - H_2O. Для формирования осадка реакционные среды после их приготовления оставляли при комнатной температуре на 20 ÷ 24 ч. После этого дисперсную фазу отделяли от раствора фильтрованием с последующим промыванием дистиллированной водой в объеме, в 1.5 раза превышаеющем объем системы. Осадок на фильтре высушивали в воздушной атмосфере при 105 °C до постоянной массы и измельчали до состояния порошка помолом в фарфоровой ступке.

ТАБЛИЦА 1
УСЛОВИЯ СИНТЕЗА ОБРАЗЦОВ

Компонент	Концентрация, моль/л
$Ca(OH)_2$	0.086 ÷ 0.100
H_3PO_4	0 ÷ 0.060
Na_2SiO_3	0 ÷ 0.086

Полученные образцы исследовали с применением комплекса физико-химических методов. Рентгенофазовый анализ выполнялся на дифрактометре «XRD-7000» (Shimadzu) с использованием CuKα излучения (λ = 1.54 Å) для оценки качественного фазового состава образцов и определения размеров кристаллитов. Для анализа гранулометрического состава образцов применяли метод лазерной дифрактометрии (анализатор размеров частиц «SALD-2300» (Shimadzu)). Особенности функционально-группового состава осадков определяли методом ИК-Фурье-спектроскопии (ИК-Фурье-спектрометр «ФТ-801» (Simex) с программой «ZaIR 3.5» для получения, обработки и расшифровки инфракрасных спектров). Морфологию частиц порошков исследовали методом растровой электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп «JCM-5700», оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром «JED-2300» (JEOL)).

IV. Результаты экспериментов

Во всех исследуемых системах получены осадки белого цвета. Они состоят из частиц различной формы (рис. 1а), образовавшихся в результате помола. Анализ элементного состава образцов, полученных в системах $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - Na_2SiO_3 - H_2O с варьируемым содержанием компонентов, показал, что свежеосажденные фазы включают Ca, P, Si, C и O (рис. 1б).

По данным лазерной дифракции (рис. 1в) порошки состоят из частиц с диаметрами 2–300 мкм, их медианный диаметр лежит в диапазоне 60–100 мкм.

Исследование образцов методом РФА позволило установить, что в их составе присутствуют кристаллические фазы гидроксиапатита (ГА, идеальная формула – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) и кальцита ($CaCO_3$) (рис. 2а). Рефлексы основного фосфата кальция на дифрактограммах слабо разрешены и вместо характерного триплета при 32.2°, 34.0° и 35.4° 2θ проявляется один пологий пик в области 30–35° 2θ, что указывает на невысокую степень

кристалличности осажденной соли. Интенсивность данного рефлекса убывает по мере уменьшения расчетного содержания апатита в материалах.

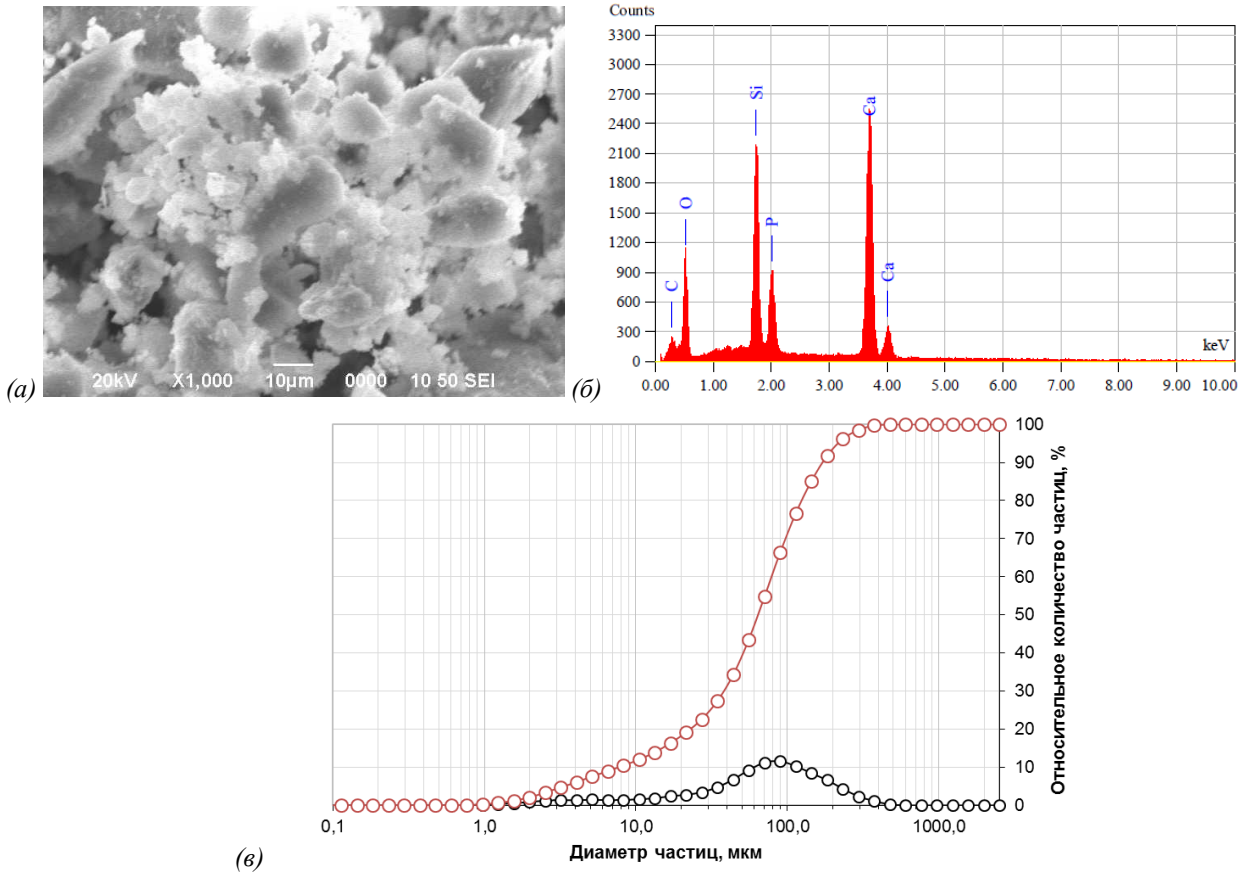


Рис. 1. Микрофотография *(а)*, ЭДС спектр *(б)* и кривые распределения по размерам частиц порошка *(в)*, полученного в системе $Ca(OH)_2$ (0.092 моль/л) - H_3PO_4 (0.024 моль/л) - Na_2SiO_3 (0.052 моль/л) - H_2O

Пики, соответствующие силикату кальция, на дифрактограммах порошков не проявляются. Однако, для образца, полученного в системе $Ca(OH)_2$ - Na_2SiO_3 - H_2O, помимо полос $CaCO_3$, фиксируется гало при 30° - 35° по 2θ, которое, согласно [5, 6], характерно для гидросиликата кальция (ГСК) со структурой, близкой к аморфной. Наложение рефлексов свежеосажденных фосфатов и силикатов кальция не позволяет однозначно установить методом РФА наличие фазы $rCaO \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ в полученных порошках. Однако на ее присутствие может указывать примесь кальцита, которая образуется в результате реакции 1.

$$rCaO \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O + rCO_2 \rightarrow rCaCO_3 + mSiO_2 + nH_2O \qquad (1)$$

На основании данных РФА по формуле Шеррера рассчитан размер кристаллитов по пикам 25.8° 2θ для ГА и 29.3° 2θ для КК (расчет размеров кристаллитов ГСК не проводился ввиду отсутствия на дифрактограммах образцов четких пиков данной фазы). Установлено, что компоненты смесей (частицы апатита и кальцита) имеют нанометровые размеры ($D_{ГА}$ = 5 - 8 нм, $D_{КК}$ = 3 - 8 нм). Следовательно, в процессе осаждения происходит агломерация нанокристаллитов солей с образованием микроскопических композитных агрегатов, фиксируемых методами растровой электронной микроскопии и лазерной дифрактометрии (рис. 1).

При изучении продуктов синтеза методом ИК-Фурье-спектроскопии обнаруживаются колебания группировок, входящих в состав ГА, ГСК и карбоната кальция (КК) (рис. 2б). Так, на спектрах образцов пики при 565, 605, 962, 1030 и 1060 $см^{-1}$, вызванные валентными колебаниями O–P–O, соответствуют апатиту. Слабое разрешение максимумов в области 1030 - 1060 $см^{-1}$ указывает на образование в изучаемых условиях плохо окристаллизованного ГА, что подтверждает данные РФА (рис. 2а).

Колебания связей C–O в составе ионов CO_3^{2-}, которые включены в состав КК и частично замещают позиции фосфатов в апатите с образованием карбонатгидроксиапатита (КГА), наблюдаются при 875, 1430 и 1470 $см^{-1}$.

В ИК-спектре контрольного образца, полученного в системе $Ca(OH)_2$ - Na_2SiO_3 - H_2O, проявляются полосы поглощения связей в силоксановых мостиках Si–O–Si (670 $см^{-1}$) и группировках Si–O (970 и 1060 $см^{-1}$), входящих в структуру ГСК [7]. В спектрах композитов также регистрируются названные моды колебаний. Их интенсивность снижается одновременно с уменьшением расчетного содержания силиката кальция в порошках.

При этом наиболее сильный рефлекс ГСК (ν = 970 см$^{-1}$) постепенно сливается с полосами поглощения фосфатов, расположенных при ν = 1030 - 1060 см$^{-1}$, и фиксируется при них как плечо.

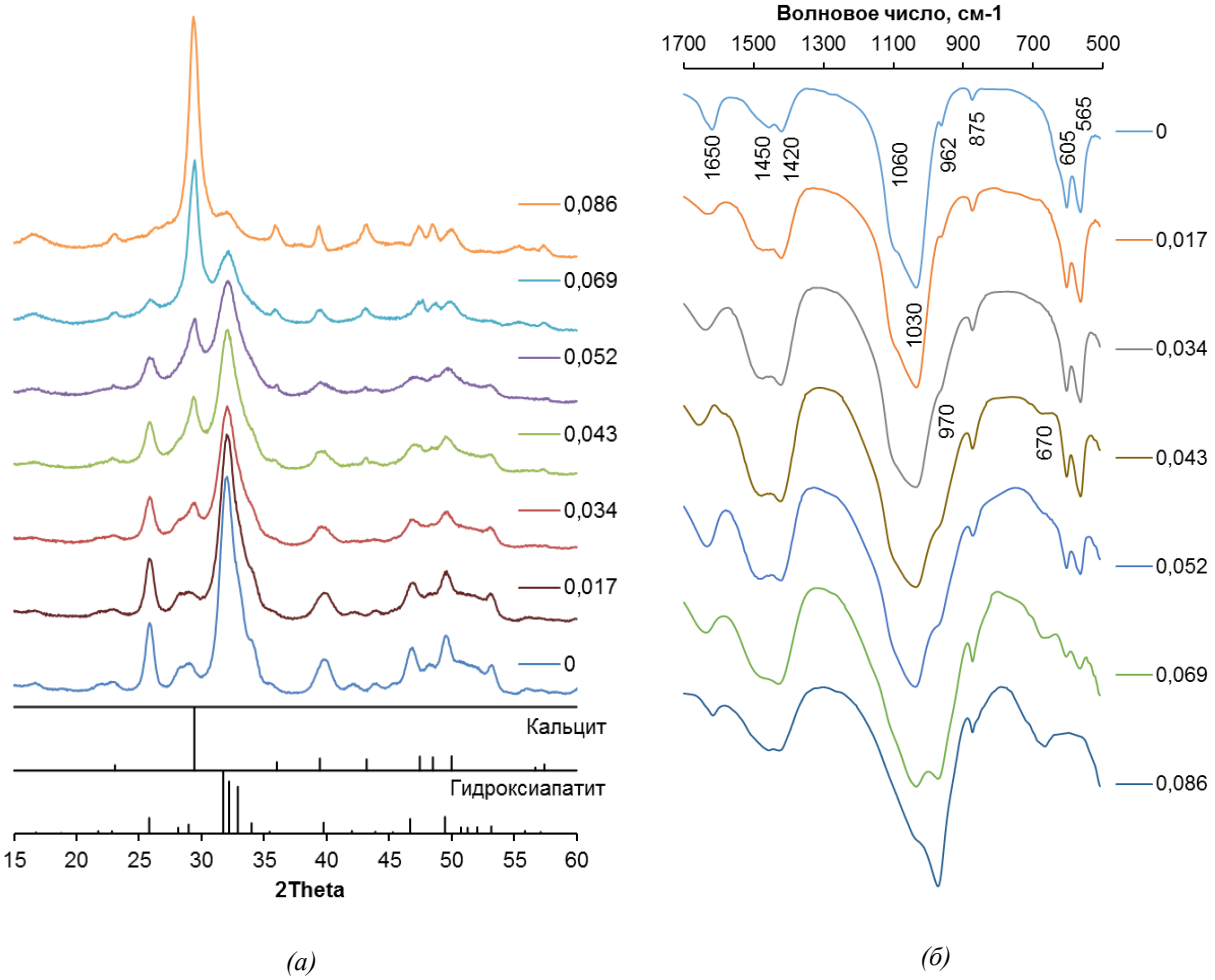


Рис. 2. Дифрактограммы *(а)* и ИК-спектры *(б)* свежеосажденных образцов.
* Подписи справа от кривых - концентрация Na_2SiO_3 (в моль/л) в реакционных средах

Таким образом, данные элементного анализа, РФА и ИК-Фурье-спектроскопии указывают на то, что в изучаемых условиях совместно осаждаются плохоокристаллизованный КГА, ГСК и КК.

V. Обсуждение результатов

Согласно литературным данным [8], в системах, содержащих ионы Ca^{2+}, PO_4^{3-} и H^+/OH^-, при pH > 4 наиболее устойчивой фазой является ГА. При превышении растворимости данной соли в водном растворе возможно осаждение апатита различного стехиометрического состава (величина Ca/P может варьировать в пределах от 1.40 до 1.92 [9]) и степени кристалличности. В условиях эксперимента получены осадки, содержащие плохоокристаллизованный ГА, в котором фосфатные группировки частично замещены карбонатами. Изоморфное замещение анионов становится возможным в присутствии CO_3^{2-} ионов в среде. В исходной реакционной системе они отсутствовали. Очевидным источником карбонат-ионов является углекислый газ, содержащийся в воздухе. Согласно [10], до 0.759 мл CO_2 способно растворяться в 1 мл воды при 25 °C и 760 мм рт.с. Таким образом, концентрация карбонатов в растворах может достигать 0.0339 моль/л, что обуславливает возможность участия данного типа ионов в процессах фазообразования. Как результат, наблюдается включение CO_3^{2-} в структуру осаждающегося ГА и вторичная реакция ионного обмена с участием ГСК и образованием КК (реакция 1).

Известно, что карбонат кальция (КК) образуется как примесь при осаждении ГСК в открытых щелочных системах [7]. В этих условиях в результате поглощения водным раствором CO_2 воздуха образуется угольная кислота, которая по силе превосходит метакремниевую и способна вытеснять ее из солей. Таким образом, за счет ионного обмена происходит частичная конверсия осаждающегося ГСК в КК (реакция 1). При этом в условиях эксперимента фиксируется тем большая интенсивность рефлексов $CaCO_3$ на дифрактограммах (и, соответ-

ственно, содержание в осадках), чем выше заданная доля СК в порошках (рис. 2а). Следовательно, имеется положительная корреляция между количествами формирующихся силикатов и карбонатов кальция.

Описанные особенности протекания реакций малорастворимых соединений в системах $Ca(OH)_2$ - H_3PO_4 - Na_2SiO_3 - H_2O обусловливают возможность одностадийного синтеза с их использованием смесей нанокристаллических фосфатов, силикатов и карбонатов кальция.

VI. Выводы и заключение

В результате исследования установлено, что композиты на основе плохоокристаллизованного апатита, гидросиликата кальция и кальцита могут быть получены одностадийным методом, заключающемся в осаждении данных малорастворимых соединений в водном растворе. Частицы свежеосажденных порошков представляют собой агрегаты равномерно смешанных наноразмерных кристаллитов данных солей.

Полученные материалы могут быть использованы в качестве минеральной основы при изготовлении керамик, матриксов, имплантантов и покрытий на них, предназначенных для восполнения дефектов костей и зубов в стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, травматологии, ортопедии.

Список литературы

1. Гусев А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 199 с.

2. Баринов С. М., Комлев В. С. Биокерамика на основе фосфатов кальция. М.: Наука, 2005. 204 с.

3. Lobo S. E., Arinzeh T. L. Biphasic calcium phosphate ceramics for bone regeneration and tissue engineering applications // Materials. 2010. No. 3. P. 815–826.

4. Солоненко А. П., Боксгорн В. В. Теоретическое и экспериментальной исследование природы процессов кристаллизации в системах $Ca(NO_3)_2$-$(NH_4)_2HPO_4$-Na_2SiO_3-H_2O // Известия Академии наук. Серия химическая. 2017. № 3. С. 439–446.

5. Чукин Д. Г. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2008. 172 с.

6. Richardson I. G. The calcium silicate hydrates // Cement and concrete research. 2008. Vol. 38. P. 137–158.

7. Yu P., Kirkpatrick R. J., Poe B., McMillan P. F., Cong X. Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H). Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy // J. Am. Ceram. Soc. 1999. Vol. 82, no. 3. P. 742–748.

8. Wang L., Nancollas G. H. Calcium Orthophosphates: Crystallization and Dissolution // Chem. Rev. 2008. Vol. 108. P. 4628–4669.

9. Чайкина М. В. Механохимия природных и синтетических апатитов. Новосибирск, СО РАН филиал «ГЕО», 2005. Гл. 2. С. 24–52.

10. Коленко Е. А. Технология лабораторного эксперимента: справочник Политехника, СПб., 1994. 629 с.

УДК 539.421.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ПОТЕРИ МЕТАЛЛА НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НА ОСНОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, РЕАЛИЗУЕМОЙ В ПРОГРАММЕ ANSYS

А. А. Нахлесткин, И. П Аистов, К. А. Вансович
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

***Аннотация*. Предложен метод определения скорости роста поверхностных дефектов, коррозионного происхождения в стенке магистральных трубопроводов под действием переменного циклического нагружения. Данный метод реализуется с помощью программного продукта ANSYS Workbench в рамках упругой механики разрушения. Получена зависимость, позволяющая производить оценку развития усталостных трещин. Показано, что полученная зависимость может использоваться для определения развития трещин и оценки безопасной эксплуатации трубопровода при переменных циклических нагрузках.**

Ключевые слова: коррозионный дефект, метод конечных элементов, усталостная трещина.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-170-174

I. Введение

Для обеспечения безостановочной работы магистральных трубопроводов необходимо эффективно оценивать остаточный ресурс трубопроводов. В реальных условиях эксплуатации на магистральных трубопроводах наблюдаются дефекты, как эксплуатационного, так и усталостного характера. Крупные аварии на действующих трубопроводах происходят в связи с развитием пластических деформаций на участках концентрации напряжений в условиях циклического воздействия напряжений. Под действием различных нагрузок трещины увеличиваются, что приводит к снижению несущей способности трубопровода и авариям. Аварии с разрывом стенки трубы ведут к загрязнению окружающей среды, потерям нефти и экономическому ущербу [2].

При проведении внутритрубной диагностики специальными приборами (ВИП) выявляются различного рода дефекты. Дефекты коррозионного происхождения представляют значительную опасность для целостности трубопроводов и занимают около 30 % от общего количества дефектов (рис. 1).

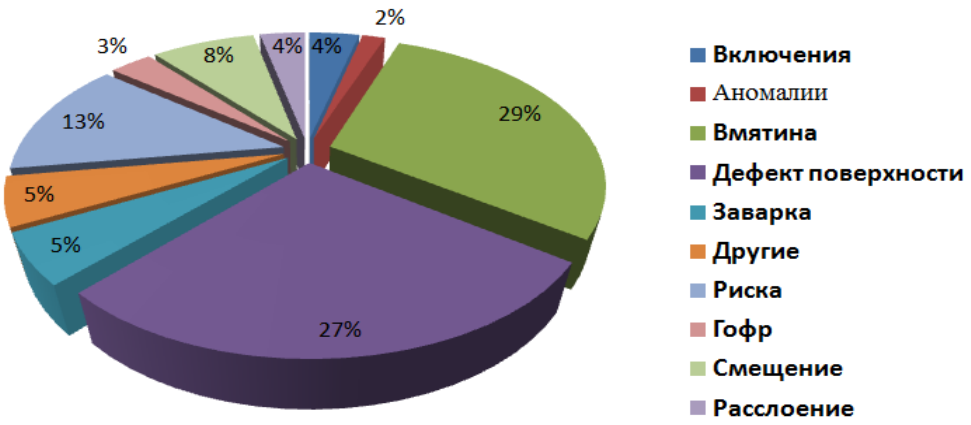


Рис. 1. Усталостные дефекты на магистральных трубопроводах

II. Постановка задачи

Наличие концентраторов напряжения, которые в процессе эксплуатации станут усталостным дефектом, создают следующую проблему: выдержит ли труба действующие на нее переменные нагрузки. Усталостный дефект коррозионного происхождения моделируется как трещиноподобный дефект. С помощью механики упругого разрушения будет рассчитываться сила, способствующая продвижению трещину [3].

III. Теория

Коррозионные язвы, трещины, также как посторонние вкрапления, выбоины, риски и царапины, образовавшиеся при строительстве трубопроводов в будущем являются основными причинами разрушения трубопроводов. Примеры коррозионных дефектов на металлических трубах представлены на рис. 2.

Рис. 2. Коррозионные дефекты на магистральных трубопроводах

Коррозионные дефекты бывают внешними и внутренними. Наибольшую опасность в процессе эксплуатации МТ представляют внешние дефекты. Главной причиной отказов систем магистральных трубопроводов является коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), называемое в отечественной терминологии стресс-коррозией, развивающиеся на внешней, катодно-защищенной поверхности трубопроводов. [4].

IV. Результаты экспериментов

В данной работе оценка несущей способности трубопровода проводится созданием математической модели коррозионного дефекта с помощью программы ANSYSWorkbench. Для этого моделируются различные нагрузки, которые испытывает трубопровод в процессе эксплуатации с учётом двухосного напряженного состояния.

Модель дефекта была создана на основе реального эксплуатационного заключения: коррозионный дефект - это, прежде всего, потеря металла трубы. Для создания модели дефекта, представленного на рис. 3, использовался графический редактор ANSYS-DesignModeler. Участок трубы с поверхностным дефектом, имеющим небольшую кривизну представлен на рис. 3.

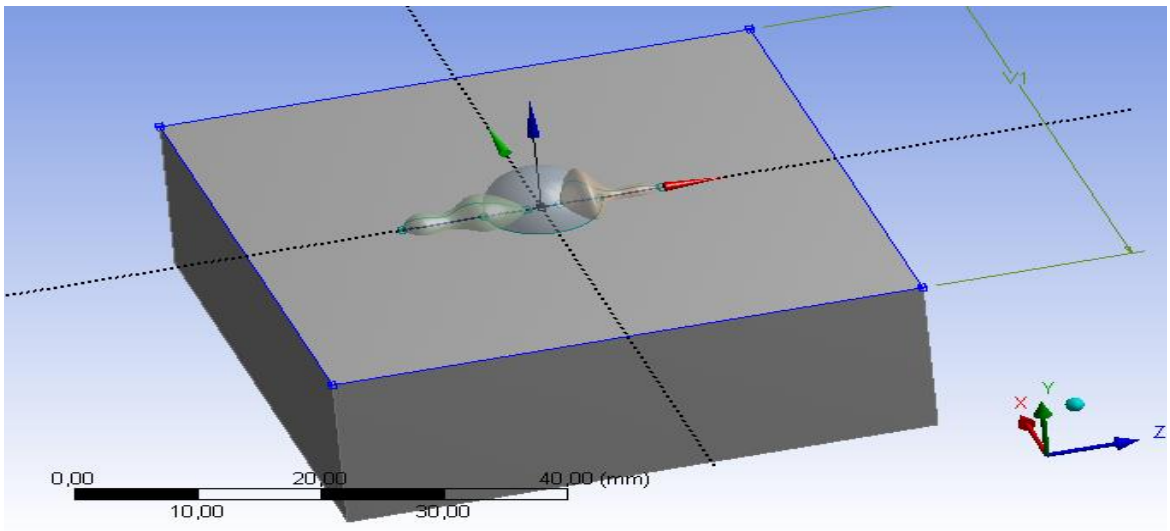


Рис. 3. Модель коррозионного дефекта на участке трубы

Модель участка трубы с коррозионным дефектом разбивается на конечные элементы в виде тераэдеров командой Mesh. Для более точного решения поставленной задачи следует уменьшить размер сетки конечных элементов в вершине трещины до величины 0,01 мм (рис. 4).

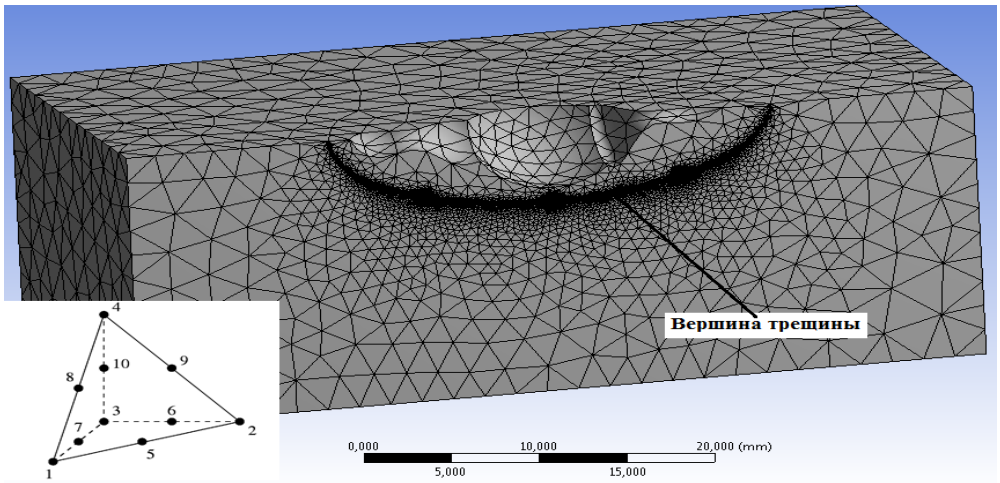


Рис. 4. Конечноэлементная модель дефекта на участке трубы

Наиболее вероятным является зарождение поверхностной трещины в точке контура коррозионного дефекта с максимальными кольцевыми напряжениями. В связи с этим в дальнейшем рассматривается модель трещины нормального раскрытия, распространяющаяся в плоскости перпендикулярной кольцевым напряжениям, т.е. в осевой плоскости трубы.

Опыт наблюдения за ростом поверхностных трещин показывает, что они стремятся принять полуэллиптическую форму, что значительно упрощает моделирование (рис. 5)

После определения главных напряжений (рис. 6) можно сделать заключение: наибольшие величины главных напряжений находятся в точках, которые расположены в области "отставания " от распространения фронта трещины, что в процессе роста приближает их к полуэллиптической форме.

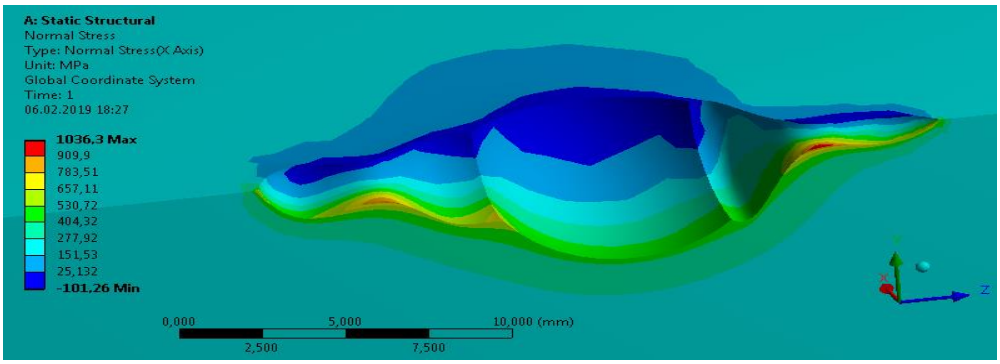


Рис. 5. Выбор плоскости предпологаемого распротранения трещины

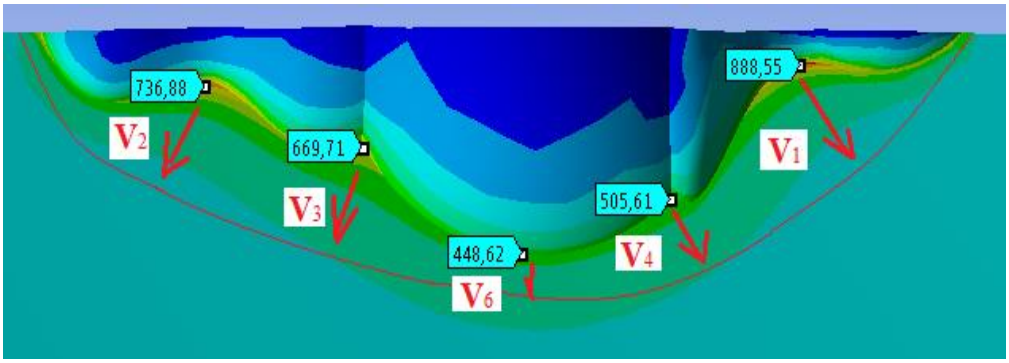


Рис. 6. Форма распространения трещины

В стенке магистрального трубопровода возникает двухосное напряженное состояние. Кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$ зависят от величины рабочего давления в трубопроводе, а продольные напряжения $\sigma_{пр}$ в зависимости от температурного перепада или направления изгиба могут быть как растягивающими, так и сжимающими,

Параметр, отражающий изменение скорости роста усталостных трещин при различных видах двухосного нагружения стенки трубопровода – коэффициент трехосности напряжённого состояния Tr [1]

$$Tr = \frac{\sigma_0}{|\sigma_1|}, \tag{1}$$

где $\sigma_0 = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее напряжение.

С учетом коэффициента трехосности эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений можно представить в виде:

$$K_I^{Tr} = Tr^x \cdot K_I, \tag{2}$$

где Tr – коэффициент трехосности напряжённого состояния;

x – показатель степени, который необходимо определить по результатам двухосных испытаний.

Коэффициент трехосности для различных видов нагружения можно определить на основе результатов исследования напряженного состояния в вершине трещины, выполненных методом конечных элементов. На рис. 7 представлены диаграммы изменения коэффициента трехосности Tr для различных видов двухосного нагружения в зависимости от расстояния от вершины трещины r, построенные для срединного сечения полуэллиптической трещины [1].

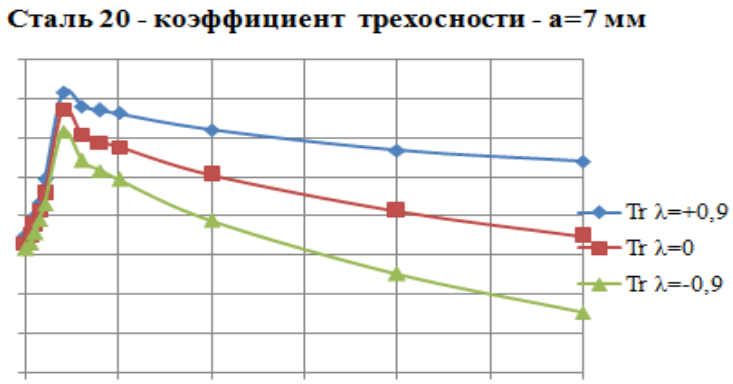


Рис. 7. Диаграммы коэффициента трехосности Tr в вершине поверхностной трещины при различных видах нагружения

С учетом (2) выражение для скорости роста трещин при различных видах нагружения, можно записать аналогично формуле Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_I^{Tr}\right)^n. \tag{3}$$

В работе [1] для стали 20 была определена константа $C = 0{,}26 \cdot 10^{-10}$, а уравнение скорости роста усталостных трещин, учитывающее характер напряженного состояния в ее вершине, будет иметь следующий вид:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = 0.26 \cdot 10^{-10} \cdot \left(Tr^{0,5} \cdot \Delta K_I\right)^{4,0} \tag{4}$$

Предложенная модель роста усталостных трещин позволяет оценить остаточный ресурс трубопровода при наличии поверхностной или несквозной трещины. Для этого интегрируется уравнение (5) и определяется остаточный ресурс N_{op}, т.е. число циклов нагружения от момента регистрации трещины $l_{рег}$ до критического размера трещины $l_{кр}$

$$N_{op} = \int_{l_{рег}}^{l_{кр}} \frac{1}{C_1\left(\Delta K_{\sigma 0}\right)^{n_1}} da \tag{5}$$

V. Обсуждение результатов

По уравнению (4) были определены точки, в которых скорости роста трещин имеют наибольшие значения $V_1 \succ V_2 \succ V_3 \succ V_4 \succ V_5 \succ V_6$.

В данной работе произведено исследование оценки опасности дефектов коррозионного происхождения, в результате чего была разработана математическая модель усталостного дефекта трубопровода, позволяющая производить оценку развития выявленных дефектов, оценивать срок безопасной эксплуатации, вводить ограничения по эксплуатируемым нагрузкам данного участка.

VI. Выводы и заключение

По результатам анализа трещиностойкости выявленных коррозионных дефектов в рамках данной методики могут быть приняты следующие решения о дальнейшей эксплуатации магистрального трубопровода:

– экстренная остановка эксплуатации;

– проведение срочного ремонта;

– назначение срока ремонта;

– снижение рабочего давления в МТ до заданной величины, определяемой расчетами, приведенными в методике;

– назначение метода контроля за размерами обнаруженного дефекта и их периодичность.

Список литературы

1. Вансович К. А, Аистов И. П. Критерий оценки скорости роста трещин в условиях двухосного нагружения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 3 (31). С. 57–61.

2. Плювинаж Г., Буледруа О., Хадж-Мелиани М. Оценка опасности коррозионных дефектов при помощи диаграммы оценки областей разрушения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 4. С. 384–396.

3. Остсёмин А. А., Заварухин В. Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Проблемы прочности. 1993. № 12. С. 1−59.

4. Фокин М. Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением // Прикладная механика и технологии машиностроения: труды Интелсервис. Нижний Новгород, 2005. С. 69−76.

УДК 629.76

АНАЛИЗ БЕСТОПЛИВНЫХ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

С. Ю. Онищук

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе произведен анализ трех систем увода объектов космического мусора (ОКМ), в условиях низкой околоземной орбиты. По принципу действия на ОКМ они являются физическими полями, действующими на заряженный ОКМ. В анализе трех систем затрагивается кулоновское, лоренцевское взаимодействие, а также действие силы Ампера. Силы Лоренца и Ампера возникают при воздействии магнитного поля Земли на заряженный ОКМ, а сила Кулона от воздействия электрического поля**

одноименно заряженного буксира. Приведены приближенные расчеты массы систем увода ОКМ, а также реактивного ускорения, необходимого для сопоставления и определения перспективной системы увода.

Ключевые слова: космический мусор, реактивное ускорение, удельный заряд, бестопливные системы увода.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-174-180

I. Введение

Проблема космического мусора не раз затрагивалась на международных конференциях и саммитах. По данным [1] при постоянном росте числа объектов космического мусора (ОКМ) к 2060 году нас ожидает увеличение на 30% их общего числа (рис. 1).

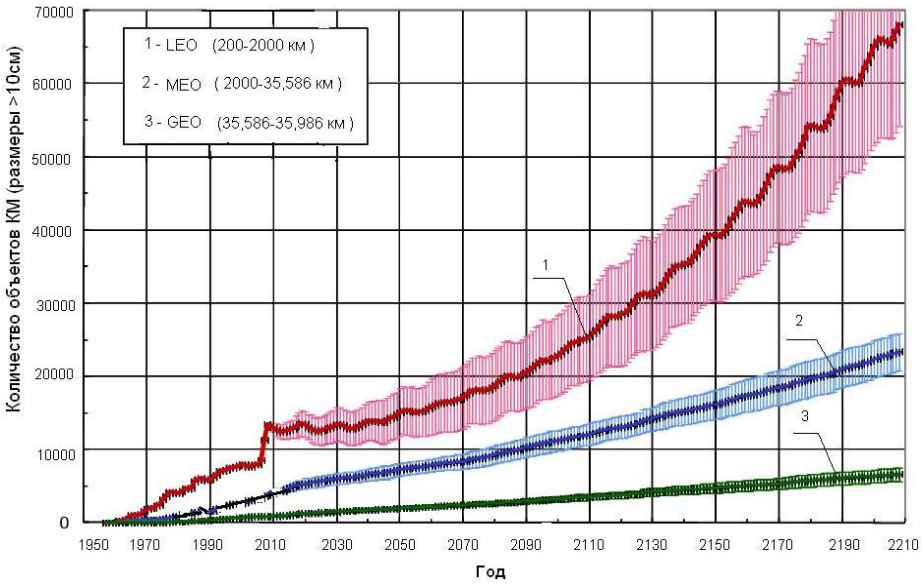


Рис. 1. Прогноз образования космического мусора [1]

На протяжении последних 20 лет активно разрабатываются системы очистки околоземной орбиты. Среди них представлены как сети, подобные рыболовным, установленные на космическом аппарате [2], так и тросовые системы с применением устройств захвата, например, гарпун [3]. Еще одним активным средством увода ОКМ можно считать разгонный блок успешно выполнивший свою основную функцию, вывод спутников, после становящийся сборщиком космического мусора, на котором установлен автономный стыковочный модуль [4].

Применение лазерного луча является инновационным, но достаточно дорогостоящим и малоэффективным относительно величины силы тяги [5].

В [6] рассмотрено применение частного случая силы Лоренца – силы Ампера, действующей на заряженный трос. В [7] представлена система спуска, включающая в себя алюминиевую сферу подключенную к устройству формирования заряда. В [8] рассмотрено управление моментом сил, возникающим вследствие воздействия на него силы Лоренца. Во всех этих способах используется магнитное поле Земли.

В [9] рассмотрено кулоновское взаимодействие двух заряженных тел.

II. Постановка задачи

Задачей исследования является определение массы и ускорения, действующего на заряженный ОКМ. Изучение возможности реализации предложенных средств очистки околоземной орбиты, используя силу Ампера, Лоренца и Кулона.

III. Теория

1. Электродинамическая тросовая система

Электродинамический трос рассмотрен в [6] в качестве взаимодействия МПЗ на проводник с током. Это взаимодействие характеризуется силой Ампера.

Сила Ампера определяется как

$$F_A = I \cdot L \cdot B \cdot \sin\theta \tag{1}$$

где B – индукция магнитного поля Земли.

Если представить ток I как отношение величины заряда q, протекающего за единицу времени t , и длину троса L расписать в виде произведения скорости движения заряда V на время t , то получим выражение для расчета силы Лоренца:

$$F_A = I \cdot L \cdot B \cdot \sin\theta = \frac{q}{t} \cdot (V \cdot t) \cdot B \cdot \sin\theta = q \cdot V \cdot B \cdot \sin\theta \tag{2}$$

Результат данного преобразования говорит об одной природе электромагнитного взаимодействия и подтверждает факт, что сила Ампера является частным случаем силы Лоренца. Поэтому всякий раз упоминая силу Ампера можно численно приравнивать ее к силе Лоренца. Магнитное поле Земли с большой точность можно заменить магнитным диполем с магнитным моментом диполя B_0.

Величина силы Ампера зависит от угла наклонения орбиты, на которой находится спутник. На экваториальной орбите сила Ампера максимальна (рис. 2).

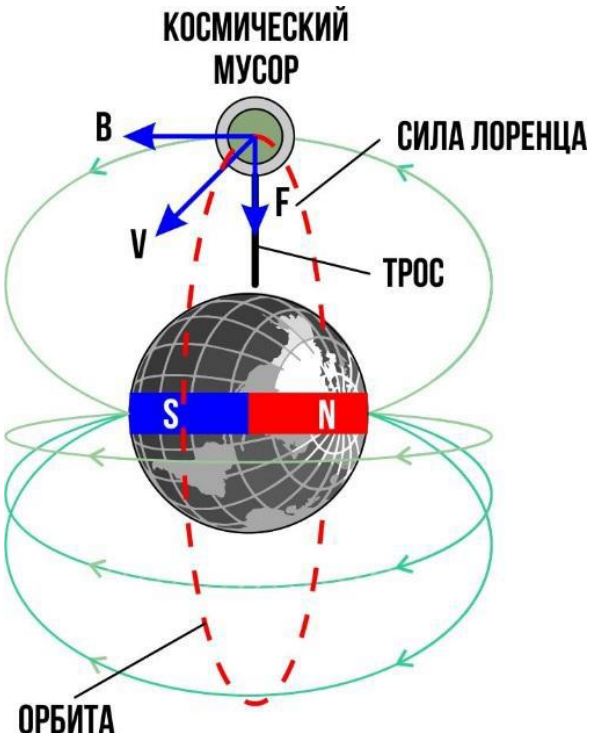


Рис. 2. Электродинамическая тросовая система [10]

Ускорение электродинамического троса равно на расстоянии r от центра Земли:

$$a_A = \frac{L}{m} \cdot I \cdot \frac{B_0}{r^3} \tag{3}$$

Масса ОКМ с системой увода m равна:

$$m = \left(m_0 + L \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \rho \right) \tag{4}$$

где m_0 – масса ОКМ и приборов системы, L , d и ρ – длина, диаметр и плотность материала троса. Подставляя (3) в (4) получим:

$$a_A = \frac{L}{m_0 + L \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \rho} \cdot I \cdot \frac{B_0}{r^3} \tag{5}$$

2. Сферический конденсатор, состоящий из двух концентрических сфер

В данном способе рассмотрены две концентрические сферы наружного радиуса R толщиной s и расстоянием между обкладками δ (рис.3). Емкость одной концентрической сферы определяется выражением:

$$C_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R \tag{6}$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, в вакууме равна 1, а ε_0 – электрическая постоянная.

Если внутрь данной сферы поместить концентрическую сферу с радиусом $R_2 = R - \delta$, то емкость конденсатора будет равна:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R}\right)} \tag{7}$$

или:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot R \cdot (R - \delta)}{\delta} \tag{8}$$

Что эквивалентно заряду одной сферы с множителем:

$$C = C_{сф} \cdot \left(\frac{R}{\delta} - 1\right) \tag{9}$$

Две концентрические сферы имеют большую емкость против одной, если $R > 2 \cdot \delta$.

Рис. 3. Алюминиевая сфера и генератор Ван де Граафа [11]

Напряжение между обкладками V задается с помощью генератора Ван де Граафа (рис. 3). Удельный заряд генерируемый представленной системой равен:

$$\lambda = \frac{C \cdot V}{m} \tag{10}$$

где полная масса системы равна:

$$m = m_0 + 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot s \cdot \left(R^2 + \left(R + \delta\right)^2\right) \tag{11}$$

$$\lambda = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot (R - \delta) \cdot V}{\delta \cdot \left(m_0 + 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot s \cdot \left(R^2 + \left(R + \delta\right)^2\right)\right)}, \tag{12}$$

Ускорение придаваемое силой Лоренца

$$a_L = \lambda \cdot \frac{B_0}{r^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{r^3}} - \omega_з\right) \tag{13}$$

где μ – гравитационный параметр Земли, а $\omega_З$ – угловая скорость вращения Земли. Таким образом, ускорение можно определить по формуле (14).

$$a_L = \frac{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot (R - \delta) \cdot V}{\delta \cdot \left(m_0 + 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot s \cdot \left(R^2 + \left(R + \delta\right)^2\right)\right)} \cdot \frac{B_0}{r^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{\mu}{r^3}} - \omega_з\right) \tag{14}$$

3. Электростатическое взаимодействие двух заряженных тел

Использование силы Кулона кардинально отличается от двух предыдущих систем характером взаимодействия. В первых двух случаях было рассмотрено взаимодействие магнитного поля Земли с движущимися в нем зарядами. В рассматриваемом случае взаимодействуют электростатическое поле, создаваемое буксиром, и ОКМ, имеющий поверхностный заряд (рис. 4).

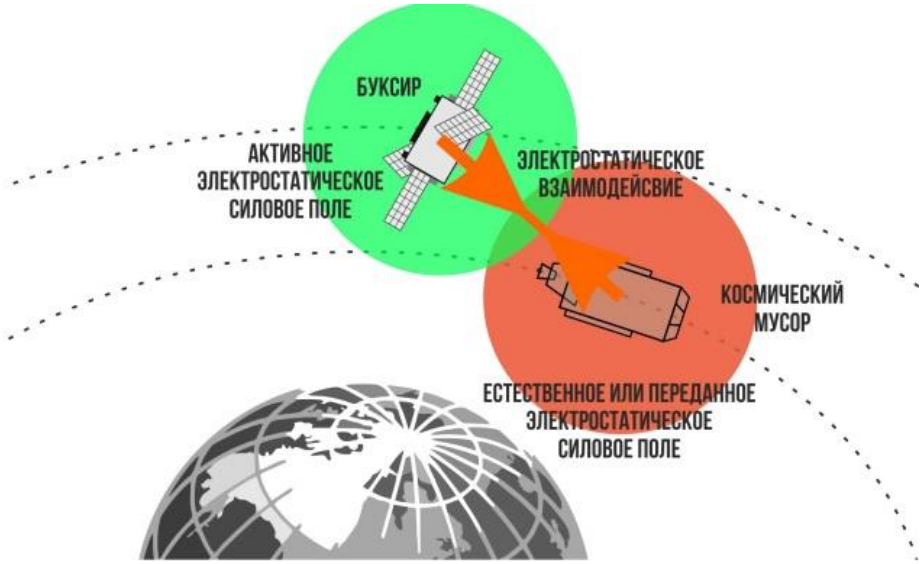


Рис. 4. Схема кулоновского взаимодействия [10]

Сила кулона равна:

$$F_K = k \cdot \frac{|q| \cdot |Q|}{r^2} \tag{15}$$

где |Q| – заряд буксира, k – коэффициент пропорциональности, равный:

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \tag{16}$$

Кулоновское ускорение:

$$a_K = \lambda \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{|Q|}{r^2} \tag{17}$$

IV. Результаты экспериментов

При анализе каждой системы масса полезного груза m_0 (в задаче увода – ОКМ) принимается равной 100 кг. Ускорения определены на высоте 1000 км от поверхности Земли (r = 7371 км от центра Земли). Дипольный момент B_0 равен $8 \cdot 10^{15}$ Тл·м^3. Диэлектрическая проницаемость среды ε в вакууме равна 1. Электрическая постоянная ε_0 равна $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Угловая скорость вращения Земли $\omega_З = 7{,}292 \cdot 10^{-5}$, рад/с

1) Для алюминиевого троса плотностью ρ 2700 кг/м^3, L длиной 10 км, d диаметром 1 см, по которому протекает сила тока I равная 20А:

суммарная масса: m_A = 2220 кг; реактивное ускорение $a_A = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ м/с^2.

2) Для алюминиевого сферического конденсатора, радиус которого R равен 5 м, толщиной s = 1 мм и расстоянием между обкладками δ = 1 см. С напряжением V = 200кВ:

суммарная масса m_L = 1800 кг; удельный заряд $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг; реактивное ускорение $a_L = 4 \cdot 10^{-6}$ м/с^2.

3) При расчете кулоновского взаимодействия масса и удельный заряд были взяты как для лоренцевского, т.е. заряд на ОКМ генерируется одинаковыми средствами. Буксир находится на расстоянии от ОКМ порядка 10 км, и несет заряд 0,054 Кл:

суммарная масса m_L = 1800 кг; удельный заряд $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг; реактивное ускорение $a_K = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ м/с^2.

V. Обсуждение результатов

По результатам расчетов было определено, что электродинамическая тросовая система обладает наибольшей массой, что увеличивает стоимость развертывания системы. Однако тросовая система позволяет развить наибольшее ускорение. И в течение 2–3 лет увести ОКМ на орбиту утилизации. Остается немало вопросов и об механизме развертывания системы. Пока еще отсутствует концепция развертывания электродинамического троса длиной больше 1 км на орбите.

Буксир развивает приемлемую тягу, но в процессе увода могут возникнуть трудности с сохранением заданного расстояния между заряженными телами. Буксиру потребуется двигательная установка для продолжительного процесса спуска ОКМ.

Хоть и заряженная сфера обладает наименьшей тягой, но и малыми габаритами, что значительно упрощает процесс ее развертывания. Для ее увода не нужно генерировать электрическое поле, как в системе электростатического увода.

VI. Выводы и заключение

Изучены бесконтактные системы активного увода с помощью воздействия физического поля на заряженный ОКМ. В статье было рассмотрено воздействие двух полей: магнитного поля Земли и электрического поля, генерируемым буксиром. Определены приближенные массы систем без учета массы генератора напряжения. Расчеты были произведены без учета времени работы двигателя. В дальнейшем планируется определить эквивалентные импульсы.

Определены реактивные ускорения систем. Среди представленных систем наибольшее ускорение развивает электродинамический трос и система кулоновского отталкивания, однако будет очень трудно их воплотить в жизнь из-за больших размеров, в одном случае, и необходимости поддерживать расстояния между заряженными телами во втором.

Наиболее перспективной является система увода с помощью силы Лоренца на низкой околоземной орбите (до 2000 км).

Источник финансирования. Благодарности

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания подведомственным образовательным организациям, проект «Повышение экологической безопасности экономической эффективности ракет-носителей с маршевым и жидкостными ракетными двигателями» задание № 9.1023.2017/ПЧ.

Благодарность научному руководителю д.т.н. проф. Трушлякову В.И.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алпатов А. П. Динамика космических летательных аппаратов: Киев. Научная мысль, 2016. 490 с.
2. Баркова М. Е. Космический аппарат для утилизации космического мусора в околоземном пространстве // Труды МАИ. 2018. № 103. С. 14.
3. Асланов В. С., Алексеев А. В., Ледков А. С. Определение параметров оснащенной гарпуном тросовой системы для буксировки космического мусора // Труды МАИ. 2016. № 90. С. 2.
4. Пат. 2531679 Российская Федерация, МПК B 64 G 1/64. Способ очистки орбиты от космического мусора / Трушляков В. И., Макаров Ю. Н., Олейников И. И., Шатров Я. Т. № 2012136161; заявл. 21.08.12; опубл. 27.10.14, Бюл. № 30
5. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // Progress in Aerospace Sciences. 2016. Vol. 80. P. 18–32.
6. Yang Y., Cai H. Extended time-delay autosynchronization method for libration control of electrodynamic tether using Lorentz force // Acta Astronautica. 2019. Vol. 159. P. 179–188.
7. Peck M. Prospects and Challenges for Lorentz-Augmented Orbits // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 15–18 August 2005, San Francisco, California. DOI: 10.2514/6.2005-5995.
8. Hughes J., Schaub H. Charged Geosynchronous Debris Perturbation Using Rapid Electromagnetic Force and Torque Evaluation // Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, held in Wailea, Maui, Hawaii, September 20–23, 2016. ID. 86.
9. Пикалов Р. С., Юдинцев В. В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. 2018. № 100. С. 2.
10. Schaub H., Sternovsky Z. Active space debris charging for contactless electrostatic disposal maneuvers // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, no.1. P. 110–118.
11. Peck M. Prospects and Challenges for Lorentz-Augmented Orbits // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 15–18 August 2005, San Francisco, California. DOI: 10.2514/6.2005-5995.

УДК 629.76

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

В. И. Трушляков, И. Ю. Лесняк, В. А. Севоян
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Предложена технология испарения ракетного топлива (керосина) в баках ракет, путём подачи во внутренний объём бака высокотемпературного газа, получаемого за счёт разложения перекиси водорода при взаимодействии с катализатором. Разработана программа и методика проведения экспериментальных исследований по моделированию процесса тепло- и массообмена при испарении керосина в баках ракет. Выбраны критерии подобия (Нуссельт, Рейнольдс, Прандтль и Био), учитывающие геометрические особенности конструкции баков ракет и характеристики внутрибаковых процессов, происходящих при испарении ракетного топлива. С учетом выбранных критериев подобия сформулированы требования к экспериментальному стенду и исходные данные для проведения экспериментов.**

Ключевые слова: тепло- и массообмен, испарение ракетного топлива, топливные баки ракет.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-180-183

I. ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации ракет-носителей (РН) с жидкостными ракетными двигателями в топливных баках ракет остаются невырабатываемые жидкие компоненты ракетного топлива. Эти остатки являются причинами взрывов отработавших ступеней РН на орбитах в околоземном пространстве, на траекториях при спуске отработавших ступеней РН с орбит выведения. Для предотвращения загрязнения околоземного космического пространства и территории поверхности Земли от взрывов отработавших ступеней РН техническим подкомитетом ООН по мирному использованию космического пространства (COPUOS) и Межагентстким координационным комитетом по космическому мусору (IADC) приняты документы, рекомендующие обязательное удаление жидких остатков топлива из баков и магистралей РН после завершения их миссии.

Испарение жидких остатков топлива в баках отработавших ступеней РН в условиях невесомости и последующее использование образовавшейся парогазовой смеси для манёвров является наиболее эффективным методом решения этой проблемы [1–2]. Испарение остатков ракетного топлива (керосина) предлагается за счет

подачи во внутренний объём бака высокотемпературного газа, получаемого за счёт разложения перекиси водорода при взаимодействии с катализатором.

Известны многочисленные фундаментальные и прикладные результаты исследований процесса испарения жидкостей, полученные в последние десятилетия, как российскими, так и зарубежными учёными. Полученные результаты, как правило, относятся к частным исследованиям воздействия одного или нескольких факторов без оптимизации их воздействия на процесс испарения жидкости.

В работе [3] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований мгновенного испарения жидкости при пониженном давлении. Установлена зависимость изменения температуры жидкости и скорости испарения жидкости от скорости сброса давления. Исследования проводились без дополнительного воздействия на жидкость конвективными потоками газа.

В работах [4–5] проведены исследования испарения капли керосина при различных условиях, в том числе в высокотемпературной естественной и вынужденной конвективной среде. В работе [4] представлены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований испарения обычного и авиационного керосина, которые показали, что чем больше конвективная скорость, тем больше скорость испарения капли керосина. Конвективное воздействие на каплю керосина осуществлялось за счет подачи ламинарного потока воздуха с использованием компрессора.

Результаты испарения капли гелеобразного керосина [5] показали, что весь процесс можно разделить на три этапа: стадия испарения керосина; формирование гелеобразующего слоя; набухание гелеобразвующего слоя и взрыв. При этом микровзрыв происходит тогда, когда температура окружающей среды превышает температуру кипения керосина.

В работе [6] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований испарения капли смеси керосина и бутанола с учетом влияния конвективного потока и индуцированной рециркуляции внутри капли. При увеличении конвективного потока, увеличивается скорость рециркуляции и испарения капли.

Совместно с Миланским техническим университетом авторами проведены исследования [7] по испарению керосина в замкнутом объёме при различных граничных условиях расположения керосина на пластине: «капля», «зеркало» и конвективном воздействии различных теплоносителей: воздух, азот. На основе проведенных экспериментальных исследований получены значения температур системы «газ-жидкость-стенка», площади массоотдающей поверхности и коэффициенты теплоотдачи газ-жидкость, газ-пластина.

Предлагаемая технология подразумевает подачу в бак с остатками керосина турбулентного высокотемпературного потока газа, состоящего из продуктов разложения перекиси водорода. Следовательно, скорость испарения керосина, температуры всех участников теплообмена и другие термодинамические параметры исследуемого процесса будут отличаться от представленных в работах [4–7].

II. Постановка задачи

Для проведения экспериментальных исследований по моделированию процесса испарения керосина при конвективном воздействии высокотемпературного потока газа, далее теплоноситель (ТН), состоящего из продуктов разложения перекиси водорода (водяной пар, кислород) необходимо разработать:

– экспериментальный стенд и входящую в него экспериментальную установку (ЭУ) с учетом критериев подобия;

– программу и методику проведения экспериментов;

– исходные данные для проведения экспериментов:

а) температура, расход и химический состав ТН;

б) масса, температура и граничные условия керосина.

При проведении экспериментов необходимо определить изменение:

– температуры всех участников теплообмена: керосина, газа внутри ЭУ, стенок ЭУ;

– массы керосина.

С использованием полученных экспериментальных данных и разработанной математической модели [8] планируется определить:

– коэффициенты теплоотдачи от ТН к керосину и стенкам ЭУ;

– коэффициенты массоотдачи;

– затраты энергии на осуществление процесса испарения керосина.

Ограничения и допущения, приняты при проведении экспериментальных исследований:

1. Рассматривается только конвективное воздействие потока ТН на испаряемый керосин, без химического взаимодействия.

2. Температура и скорость натекания ТН на поверхность керосина определяются из условия теории подобия.

3. Температура керосина по всему объёму принимается усредненной.

4. Керосин рассматривается без колебаний свободной поверхности.

5. Тепловые потоки в ЭУ между керосином и стенкой ЭУ отсутствуют, так как керосин расположен в ванне, которая изолирована от стенок ЭУ.

III. Теория

Для проведения экспериментальных исследований по моделированию процесса испарения керосина в баках РН при подаче высокотемпературного газа в виде продуктов разложения перекиси водорода на наземном экспериментальном стенде, необходимо обеспечить подобия исследуемого процесса.

Для обеспечения подобия исследуемого процесса на примере испарения керосина в баке второй ступени РН типа «Союз-2.1в» выбраны критерии подобия Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Био [9] (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 1
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КЕРОСИНА

Параметры	**Бак горючего РН «Союз-2.1в»**	**ЭУ**
1. Химический состав ТН	Продукты разложения перекиси водорода: 66% водяного пара + 34% газа кислорода	66% водяного пара + 34% газа кислорода
2. Температура ТН, К	1000–1200	1000–1200
3. Скорость натекания ТН, м/с	5–6	10–15
4. Характерный размер, м	Длина бака – 2.3	Длина ЭУ – 0.5
5. Начальная температура керосина, К	280	291 – 293
6. Начальная масса керосина, гр	210000	50
7. Граничные условия керосина	На дне бака; в виде капель по всему объёму бака	«Зеркало», «капли»
8. Число Рейнольдса	$7.6*10^5$–$9.2*10^5$	$1.5*10^5$–$2.3*10^5$
9. Число Прандтля	0.015	0.015
10. Число Нуссельта	450-540	440-530
11. Число Био	0.004	0.004

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

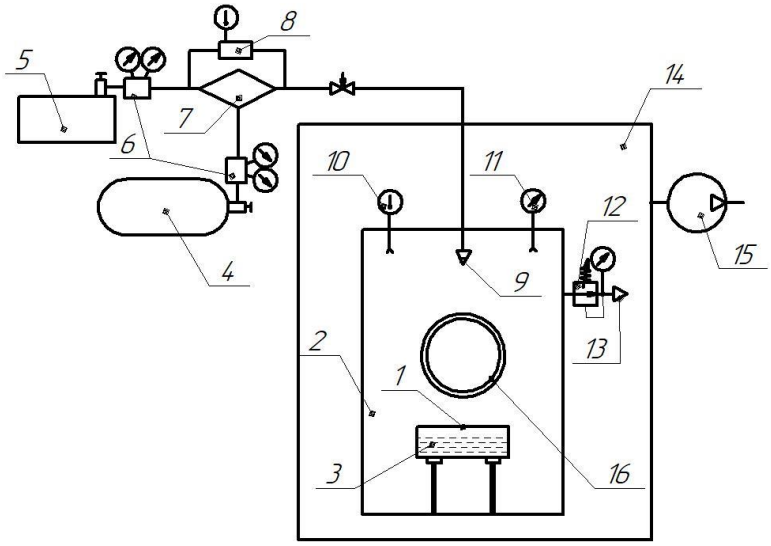


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – ванна для размещения керосина; 2 – ЭУ; 3 – керосин; 4 – баллон с кислородом; 5 – испаритель; 6 – газовый редуктор; 7 – смеситель водяного пара и кислорода; 8 – нагреватель смеси водяного пара и кислорода; 9 – штуцер ввода ТН в ЭУ; 10 – мобильные датчики температуры; 11 – датчик давления; 12 – электромагнитный клапан; 13 – штуцер вывода газа в вытяжной шкаф; 14 – вытяжной шкаф; 15 – вентилятор-вытяжка; 16 – смотровое окно

В состав экспериментального стенда входят:
– ЭУ, моделирующая объём топливного бака РН;
– ванна для размещения керосина;
– баллон с кислородом;
– испаритель, для получения водяного пара;
– смеситель водяного пара и кислорода;

– нагреватель смеси водяного пара + кислорода;

– вытяжной шкаф;

– соединительная и запорная арматура;

– система измерений и регистрации данных: датчики давления, расхода ТН, температуры, скоростная видеокамера, лабораторные весы.

Методика проведения экспериментов заключается в подаче в замкнутую ёмкость ТН и измерении количественных характеристик параметров процесса испарения керосина для последующего определения затрат энергии на осуществление исследуемого процесса.

Условие прекращения эксперимента: фиксированное время проведения эксперимента или полное испарение керосина.

Перед началом проведения эксперимента в ванну 1, установленную в ЭУ 2 заливается необходимое количество керосина 3. Открываются вентили баллона с кислородом 4 и испарителя 5. Устанавливается необходимое давление кислорода и водяного пара с помощью газовых редукторов 6. Кислород и водяной пар с заданным массовым соотношением поступают по трубопроводам в смеситель 7. Полученная смесь газов достигает заданной температуры с помощью нагревателя 8 и поступает в ЭУ 2 через входной патрубок 9. Угол подачи ТН в объём ЭУ 2 задается заранее, до начала эксперимента.

Температуры керосина, газа в ЭУ 2, стенок ЭУ и ТН определяются с помощью мобильных датчиков температуры 10 (термопары). Давление газа в ЭУ 2 определяется с помощью датчика давления 11.

При достижении определенного давления в ЭУ 2 открывается электромагнитный клапан 12, расположенный на выходном патрубке 13 и газовая смесь поступает в вытяжной шкаф 14 и вентилятор - вытяжку 15.

Масса жидкости определяется с помощью лабораторных весов в начале и в конце эксперимента.

Наблюдение за процессом испарения керосина осуществляется через смотровое окно 16 в ЭУ2.

IV. Выводы и заключение

1. Предложена технология испарения ракетного топлива (керосина) в баках ракет, путём подачи во внутренний объём бака высокотемпературного газа, получаемого за счёт разложения перекиси водорода при взаимодействии с катализатором.

2. Разработана схема экспериментального стенда для проведения исследований по моделированию процесса тепло- и массообмена при испарении керосина в баке второй ступени РН типа «Союз-2.1в».

3. Разработаны требования к экспериментальному стенду, исходные данные, программа и методика проведения экспериментов, с учетом выбранных критериев подобия Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля и Био.

Источник финансирования

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания подведомственным образовательным организациям, проект «Повышение экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с маршевыми жидкостными ракетными двигателями» задание № 9.1023.2017/ПЧ.

Список литературы

1. Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu, Lesnyak I. Yu, Rozhaeva K. A., Dron M. M., Zharikov K. I., Galfetti L. Gasification of liquid propellant residues in fuel tanks of upper stages to feed an onboard de-orbiting system // 6th European conference for aeronautics and space sciences (Eucass). 2015. Krakow.

2. Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Lesnyak I. Yu., Lempert D. B., Zarko V. E. The modeling of unused propellant residues processes from a tank of rocket stage // Proceedings of the 56th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences. Tel-Aviv & Haifa. Israel. 2016. ThL1T4.4.

3. Wang C., Xu R., Chen X. [et al.]. Study on water flash evaporation under reduced pressure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 131. P. 31–40.

4. Wang F., Liu R., Li M., Yao J. & Jin J. Kerosene evaporation rate in high temperature air stationary and convective environment // Fuel. 2018. Vol. 211. P. 582–590.

5. Yang D., Xia Z., Huang L., Ma L., Feng Y. & Xiao Y. Exprimental study on the evaporation characteristics of the kerosene gel droplet // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 93. P. 171–177.

6. Chen L., Li G. & Fang B. Droplet evaporation characteristics of aviation kerosene surrogate fuel and butanol blends under forced convection // International Journal of Multiphase Flow. 2019. Vol. 114. P. 229–239.

7. Trushlyakov V. I, Lesnyak I. Y., Galfetti L. An experimental investigation of convective heat transfer at evaporation of kerosene and water in the closed volume // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Vol. 24, no. 5. P. 771–781.

8. Trushlyakov V., Lavruk S. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. P. 241–247.

9. Богданов С. Н., Бучко Н. А., Гуйго Э. И. [и др.]. Теоретические основы хладотехники. Тепломассообмен. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.

УДК 004.8

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Е. А. Андреева, Я. А. Галустьян
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
Научный руководитель: Данилова О.Т., к.ф.–м.н., доцент

Аннотация. **В данной статье представлен подход к оценке взаимосвязи защитных мер, уязвимостей и угроз. Оценка проводилась с применением графовой модели с полным перекрытием, что позволило сформировать матрицу парных сравнений. Приоритеты для выбранных наборов защитных мер, уязвимостей и угроз определены по методу парных сравнений. Полученное значение остаточной вероятности реализации всех возможных угроз позволяет судить о защищенности системы в целом.**

Ключевые слова: безопасность, оценка эффективности, метод иерархий.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-184-187

I. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует множество методик оценки угроз безопасности. В данной работе представлено использование метода парных сравнений для количественной оценки угроз защищаемому объекту. Данный метод не приводит к «правильному» решению, а лишь определяет суть проблемы и требования к ее решению

Оценка эффективности систем защиты информации в Российской Федерации опираются на руководящие документы, изданные ФСТЭК, а также на ГОСТы, например ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 и другие. Так же на основе требований, предъявляемых к данной системе защиты, при помощи используемого метода была количественно определена оценка эффективности этих требований применительно к данной системе [1].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленных целей в качестве объекта исследования была выбрана автоматизированная система (АС). Источниками осуществления инцидентов информационной безопасности являются уязвимости, приводящие к реализации угроз. Угрозы информационной безопасности проявляются через возможное взаимодействие с наиболее слабыми звеньями системы защиты, то есть через факторы уязвимости.

Основной задачей исследования является выявление требований, предъявляемых к системе защите определенного объекта информатизации, а также оценка эффективности использования данных требований.

III. ТЕОРИЯ

Суть метода заключается в сравнении изучаемых факторов между собой. Цель сравнения – выявить наиболее приоритетный фактор.

Основным элементом, показывающим эффективное взаимодействие между факторами, является матрица парных сравнений. При сравнении пары факторов необходимо установить, какой из факторов лучше (хуже) другого по отношению к их воздействую на общую для них характеристику, выражая данную связь количественной оценкой.

Данная матрица парных сравнений должна удовлетворять следующим требованиям:

– на главной диагонали матрицы всегда ставится 1, т.к. $a_{ij}=a_{ji}$,при $j=i$;

– должно выполняться условие, что, если при сравнении i–го элемента матрицы с j–м элементом ставится оценка a_{ij}, то при обратном сравнении – a_{ji}, т.е. $a_{ji}=1/a_{ij}$ [2].

Общее представление матрицы парных сравнений отображено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТРИЦЫ ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

Факторы	$\mathbf{A_1}$	$\mathbf{A_2}$	**...**	$\mathbf{A_n}$
$\mathbf{A_1}$	1	a_{12}		a_{1n}
$\mathbf{A_2}$	a_{21}	1		a_{2n}
...			...	
$\mathbf{A_n}$	a_{n1}	a_{n2}		1

Для сравнения факторов чаще всего используется шкала относительной значимости, которая представляет собой ряд числовых значений от 1 до 9. Данное представление шкалы относительной значимости приведено в таблице 2 [3].

ТАБЛИЦА 2
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ШКАЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЗНАЧИМОСТИ

Описание отношения первого объекта ко второму	**Лингвистическая переменная**
Абсолютное (подавляющее) превосходство	9
Очевидное превосходство	7
Сильное (существенное) превосходство	5
Умеренное (слабое) превосходство	3
Равная значимость	1

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рассмотренной системе были выявлены наиболее вероятные уязвимости, приводящие к реализации соответствующих угроз.

Для определения взаимосвязей между уязвимостями (r_i), угрозами (o_i) и требованиями по обеспечению защитных мер (d_i) обратимся к теоретико-графовому подходу в виде модели с полным перекрытием (рис. 1).

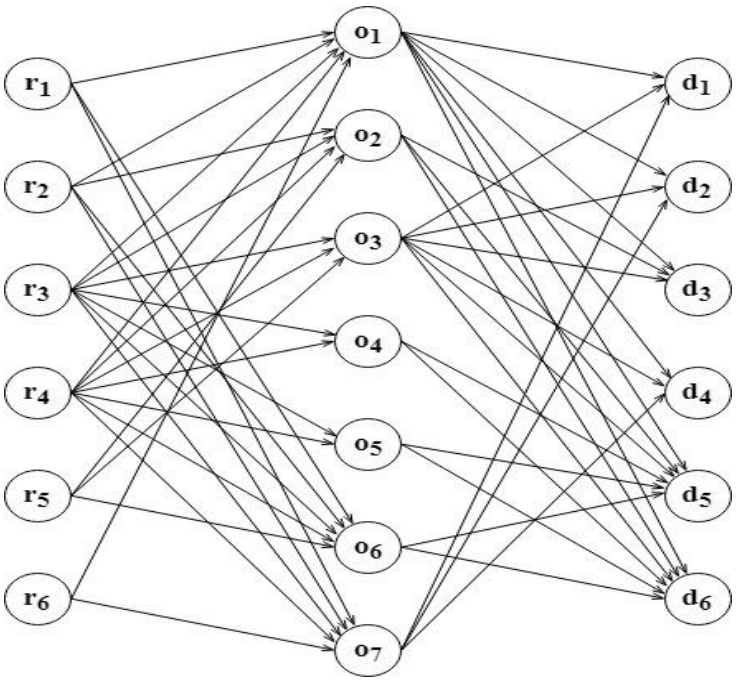


Рис. 1. Граф взаимодействия защитных мер, угроз и уязвимостей

В представленной модели вершины графа представляют собой совокупности:

1) требований к системе защиты

$$D = \{d_1; d_2; d_3; d_4; d_5; d_6\};$$

2) возможных угроз

$$O = \{o_1; o_2; o_3; o_4; o_5; o_6; o_7\};$$

3) предполагаемых уязвимостей

$$R = \{r_1; r_2; r_3; r_4; r_5; r_6\}.$$

Далее следует перейти к формированию матрицы парных сравнений, весовые коэффициенты в которой будут представлены значениями вероятностей реализации угроз при выявлении соответствующей им уязвимостей. Последовательность исполнения такой задачи производится в следующем порядке [3, 4].

1. Вычисление показателя важности каждого из факторов a_i по формуле:

$$a_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}\text{, где } i = 1, \dots, n \tag{1}$$

2. Определение суммарного показателя важности всех факторов a_j:

$$a_c = \sum_{i=1}^{n} a_i \tag{2}$$

3. Расчет весовых коэффициентов факторов P_i производится по следующей формуле:

$$P_i = \frac{a_i}{a_c}\text{, где } i = 1,2, \dots, n \tag{3}$$

В табл. 3 представлены значения, определенные по результатам расчетов, для выбранных перечней угроз, уязвимостей и защитных мер.

ТАБЛИЦА 3
ПЕРЕЧЕНЬ УГРОЗ, УЯЗВИМОСТЕЙ И ЗАЩИТНЫХ МЕР

№	Наименование	Значение
	Угрозы	
1	Несанкционированный доступ (НСД) к защищаемой информации	0,2
2	Негативное воздействие на программно–технические компоненты информационной системы (ИС)	0,1
3	Внесение неисправностей, уничтожения технических и программно технических компонентов ИС путём физического воздействия	0,05
4	Хищение (утрата) носителей информации и производственных отходов	0,15
5	Компрометация технологической (аутентификационной) информации путём визуального несанкционированного просмотра и подбора с использованием штатных средств	0,25
6	Выведение компьютера из строя	0,15
7	Осуществление НСД к информации при ее передаче	0,1
	Уязвимости	
1	Недостаток разграничения доступа	0,15
2	Наличие вредоносного программного обеспечения	0,25
3	Недостаток организации технической защиты информации от НСД	0,15
4	Невнимательность сотрудников	0,25
5	Сбои в работе аппаратного и программного обеспечения	0,1
6	Реализация протоколов сетевого взаимодействия и каналов передачи данных	0,1
	Защитные меры	
1	Требования по защите информации от НСД	
2	Требования к межсетевым экранам	
3	Требования к средствам вычислительной техники от НСД	
4	Требования к антивирусным средствам	
5	Требования к политике безопасности	
6	Требования к персоналу	

Согласно полученным результатам расчетов определена зависимость угроз при выявлении определенной уязвимости (рис. 2), позволяющая визуализировать значения наиболее значимых угроз защищаемому объекту.

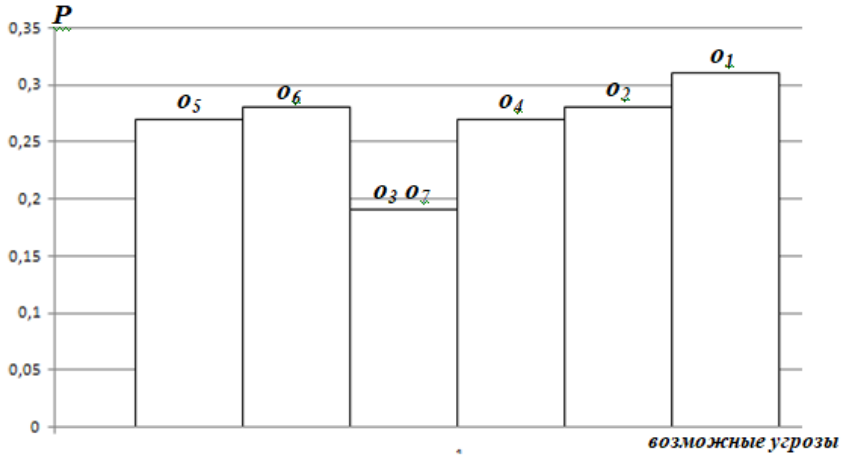


Рис. 2. Гистограмма реализации угроз

Количественная оценка значения остаточной вероятности реализации всех возможных угроз позволит судить о защищенности системы в целом. Данная вероятность рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$P_{ост} = 1 - \prod_{i=1}^{6}\left[1 - o_{0,j}\left(1 - \prod_{k=0}^{5}(1 - H_{j,k})\right)\right], \quad (4)$$

где o_j - вероятность осуществления соответствующей угрозы.

В данном выражении матрица вероятностей $H = ||h_{jk}||$ с учетом полученных в результате вычислений значениями выглядит следующим образом:

$$H = \left|\left|h_{ji}\right|\right| = \begin{vmatrix} 0{,}27 & 0{,}28 & 0{,}20 & 0{,}12 & 0{,}19 & 0{,}26 \\ 0{,}25 & 0{,}27 & 0{,}06 & 0{,}14 & 0{,}28 & 0{,}23 \\ 0{,}05 & 0{,}05 & 0{,}19 & 0{,}02 & 0{,}05 & 0{,}05 \\ 0{,}03 & 0{,}03 & 0{,}08 & 0{,}27 & 0{,}03 & 0{,}03 \\ 0{,}01 & 0{,}01 & 0{,}09 & 0{,}27 & 0{,}01 & 0{,}01 \\ 0{,}21 & 0{,}23 & 0{,}19 & 0{,}09 & 0{,}27 & 0{,}11 \\ 0{,}18 & 0{,}13 & 0{,}19 & 0{,}10 & 0{,}17 & 0{,}31 \end{vmatrix}$$

где h_{jk} – вероятность реализации j-й угрозы от соответствия k-му требованию.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в сфере информационной безопасности приводят к выводу о том, что нельзя с уверенностью говорить о полной безопасности компьютерных систем. Каждая отдельно взятая угроза может привести к реализации определенного ущерба − морального или материального, а защита и противодействие обеспечивает снижение данного ущерба значительно или частично. Полученное в работе численной значение остаточной вероятности реализации всех возможных угроз для представленного примера $P_{ост}=0{,}46$, что позволяет сделать вывод о необходимости применения выделенных требований к защитным мерам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель. Введ. 2009-10-01. М.: Стандартинформ, 2014. 58 с.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
4. Постников В. М., Спиридонов С. Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 6. С. 267–287. DOI: 10.7463/0615.0780334.
5. Постников В. М., Спиридонов С. Б. Выбор весовых коэффициентов локальных критериев на основе принципа арифметической прогрессии // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2015. № 9. С. 237–249. DOI: 10.7463/0915.0802449.

УДК 004.04

МЕТОДЫ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ж. В. Голикова, А. Г. Янишевская
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе рассмотрены и проанализированы основные факторы, влияющие на интеграцию данных систем на предприятии. Представлены возможные решения, необходимые для задач интеграции данных между различными системами. В данной статье описываются основные подходы к интеграции информационных систем, которые в свою очередь демонстрируют возможные способы решения различных проблем предприятий, связанных с необходимостью организации взаимодействия разнородных систем.**

Ключевые слова: интеграция данных, корпоративные системы, сопоставление схем данных.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-188-191

I. Введение

Интеграция данных в информационных системах предполагает обеспечение единого унифицированного интерфейса для предоставления пользователям самих данных или соединенных данных из различных неоднородных независимых источников данных. Таким образом, информационные ресурсы интегрируемых источников выступает как новый единый источник – система интеграции данных. Такая система позволяет сократить работу пользователя, освобождая от необходимости самостоятельно отбирать источники, имеющие необходимую информацию, при этом обращаясь к каждому источнику по отдельности, а также объединять и сопоставлять найденные данные из различных источников вручную. В качестве интегрируемых источников данных относятся различные модели баз данных, такие как реляционные, объектные, графовые и другие, а также репозитории, файлы структурированных данных и веб-сайты, состав которых может быть динамически пополняемым, обновляемым или наперед заданным. Существование большого количества разных источников данных и отсутствие механизмов их объединения усложняет использование информации.

К основным проблемам интеграции данных можно отнести разнородность, автономность и распределенность источников данных.

Проблема интеграции стала привлекать большое внимание в последние года, ходя, первые работы в этой области уже проводились в середине 70-х. Именно тогда уже начались разработки распределенных систем баз данных, когда сформировались более четкие представления о многоуровневой архитектуре систем баз данных. В последние годы проблемы интеграции неоднородных данных стали играть важную роль.

Интеграция систем актуальна и в наши дни. Вопросам интеграции данных рассматриваются в статьях Глеба Ладыженского, директора по технологиям Oracle СНГ. Шундеев А.С. и Першин И.С. в своей работе рассматривают подходы к решению задач интеграции данных, используемые при построении корпоративных информационных систем.

Целью данной работы является рассмотрение методов интеграции данных и выявление оптимального решения для корпоративных систем.

II. Постановка задачи

Интеграция является одной из самых сложных задач в информационных технологиях, для решения которой необходимо проанализировать саму задачу и выделить соответствующие параметры, отвечающие за сложность интеграции, и уже на основе анализа предложить варианты минимизации негативного влияния этих параметров. В данной работе рассмотрим основные подходы к интеграции, демонстрирующие возможные способы решения различных проблем предприятий, связанных с необходимостью организации взаимодействия систем.

III. Теория

Можно выделить три основных параметра, которые вызывают сложность в процессе интеграции на предприятии, такие как концептуальная разница, технологическая разница и несовместимость лицензий. Концептуальная разница заключается в разности решений и допущений систем на предприятии, которые не стыкуются между собой. Решить данную проблему возможно только созданием межсистемного слоя, который не будет противоречить подходам систем. При этом уже созданная система может служить как централизованная система, либо оставить системы предприятия независимыми, а новая система обеспечит прослойку между ни-

ми. Технологическая разница подразумевает несовместимость протоколов взаимодействия и/или форматов обмена данными, решением которых может служить написание конвертов, прослоек и т.д. Что касается несовместимости лицензий, то решение в данном случае должно быть индивидуальным, на организационном уровне.

Существование разных источников данных и отсутствие механизмов их объединения усложняют использование информации. Оптимальным решением можно считать только единый источник достоверных данных в масштабах предприятия. Именно поэтому интеграция является вынужденной мерой для предприятий, направленной на повышение эффективности бизнес-процессов, в которых используются разные системы.

Любая информационная система, как правило, состоит из нескольких компонентов, поэтому интеграция информационных систем подразумевает интеграцию составляющих их компонентов.

Информационные системы предприятий состоят из (рис. 1):

1. Платформа, позволяющая осуществлять функционирование компонентов системы.
2. Данные хранящиеся в базах данных и сама система управления базами данных.
3. Приложения, состоящие из бизнес-логики по работе с данными, пользовательского интерфейса, сервера приложений и вспомогательных компонентов.
4. Бизнес-процессы.

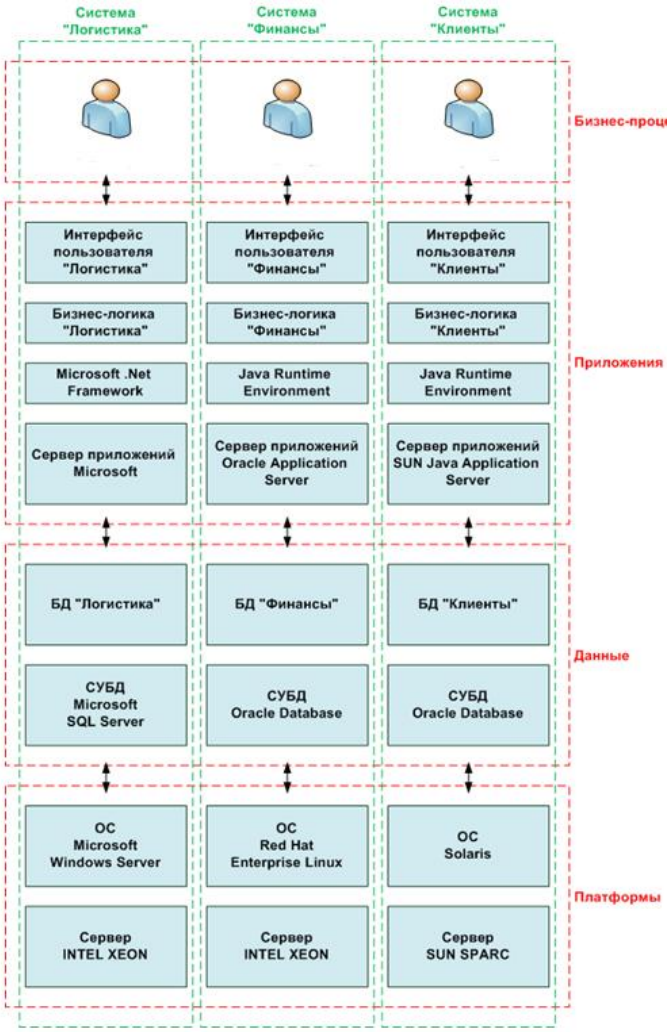


Рис. 1. Основные компоненты информационной системы предприятия

Интеграция платформ обеспечивает взаимодействие между приложениями, которые могут работать на различных платформах, либо приложение, разработанное для одной платформы, дает возможность работать на других платформах. Для решения этих задач можно выделить следующие подходы: программное обеспечение промежуточного слоя, удаленный вызов процедур или виртуализация.

Интеграция данных позволяет использовать данные различных систем. Интеграция на уровне данных проходит гораздо легче, чем интеграция приложений, за счет ограниченности возможностей программ. Для реализации данной задачи можно выделить два основных подхода: универсальный доступ к данным и хранилище данных. Тех-

нологии универсального доступа обеспечивает доступ к данным различных систем управления базами данных. Наиболее распространенные технологии этого класса: ODBC, JDBC, ADO.NET. Кроме того, на сегодняшний день широко распространены технологии объектно-реляционного отображения (ORM), которые также позволяют абстрагироваться от деталей взаимодействия с конкретными системами управления базами данных.

Хранилище данных представляет собой отдельную самостоятельную базу данных, хранящую в себе данные из баз данных различных информационных систем, с целью их дальнейшего анализа. Для повышения производительности выполнения сложных многомерных запросов по многим параметрам используют технологии OLAP. Подходы к созданию и наполнению хранилищ данных отражены в парадигме ETL-extraction, transformation, loading = извлечение, преобразование и загрузка.

Интеграция нескольких систем заключается в передаче информации между ними, например, в форме запрос-ответ. Если системы функционируют в гетерогенных распределенных средах, то принципиальное значение имеет обеспечение гарантированности, безопасности, управляемости доставки информации между приложениями.

Наиболее целостным подходом к интеграции систем является интеграции на уровне бизнес-процессов, в рамках которых происходит не только интеграция бизнес-процессов, но и интеграция приложений, данных, а также людей, вовлеченных в этот бизнес-процесс.

IV. Результаты экспериментов

Исходя из анализа существующих методов интеграции, для предприятий более подходящим можно отнести интеграцию на уровне бизнес-процессов. Так как деятельность любого предприятия состоит, прежде всего, именно из бизнес-процессов, а не приложений, баз данных и платформ.

В результате, выделим основные задачи, необходимые для интеграции бизнес-процессов:

1. Составить сценарий бизнес-процесса, описать в нем операции взаимодействия пользователей с различными системами и систем между собой. Бизнес-процесс участвует в качестве элемента, логически интегрирующим различные системы. Сценарий создается при помощи специализированной программы, которая в дальнейшим будет управлять ходом этого бизнес-процесса согласно составленному сценарию.
2. Детально описать в терминах информационного обмена операции взаимодействия систем в рамках бизнес-процесса. Например, события, политики, правила и другое.
3. Обеспечение автоматизированного информационного обмена между системами.
4. Обеспечить взаимодействие между системами, осуществляемое автоматически интегрирующим программным обеспечением.

V. Обсуждение результатов

Благодаря интеграции бизнес-процессов на предприятии можно существенно сократить трудозатраты сотрудников на дублирующиеся и бумажные операции. Данный метод подразумевает ввод стандартизации – необходимость использования как можно больше международных, государственных и отраслевых стандартов, а если каких-то не хватает, то нужно вводить корпоративные стандарты, что позволяет упростить представление данных. В качестве недостатка данного метода можно отнести присутствие фиксации. Если структуры или процессы изменяются, то образуются проблемы и узкоспециализированные, требующие частного решения.

VI. Выводы и заключение

В работе рассмотрены основные подходы к интеграции информационных систем, которые демонстрируют способы решения различных проблем предприятий, связанные с необходимостью организации взаимодействия программ и использование данных этих программ в единообразном виде. Исходя из анализа существующих методов интеграции, более подходящим можно считать интеграцию на уровне бизнес-процессов. Все же имеет смысл создание более нового метода, выступающего в качестве универсального инструмента интеграции предприятия, так как целесообразно подбирать метод интеграции под конкретное предприятие, исходя уже от специфики имеющихся систем.

Список литературы

1. Шундеев А. С., Першин И. С. Интеграция данных: от баз данных к информационным ресурсам // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-09): материалы всеросс. конф. с междунар. участием, 22–24 ноября, 2009. г. Новосибирск. Т. 2. 2009. С. 41–46.

2. Engmann D., Massmann S. Instance Matching with COMA++ BTW 2007 Workshop: Model Management und Metadaten. Verwaltung. 2007.

3. Friedman T., Beyer M., Bitterer A. Magic Quadrant for Data Integration Tools. Gartner RAS Core Research Note G00160825. 2008. URL: http://mediaproducts.gartner.com/reprints/sas/vol5/article4/article4.html.

4. Cheung K., Drennan J., & Hunter J. Towards an Ontology for Data-driven Discovery of New Materials // AAAI Workshop on Semantic Scientific Knowledge Integration, Stanford University. 2008. P. 26–28.

5. Пономаренко Л. А., Танянский С. С., Филатов В. А. Интеграция информационных систем при частичном отображении моделей данных // Проблемы системного подхода в экономике. 2008. Вып. 26. С. 33–44.

УДК 004.652

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ПРИБОРОВ И ИХ ПОКАЗАНИЙ ТЕПЛОЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. С. Кафизов[1], Н. О. Раков[1], А. В. Гаак[1], Д. А. Тюньков[2], А. С. Грицай[2]

[1]ООО «НИИАР Генерация», г. Димитровград, Россия

[2]Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В данной статье была рассмотрена система учета приборов и их показаний в формате электронных таблиц. Далее была разработана новая структура базы данных, где установлены все необходимые связи, которая будет в дальнейшем использоваться для программного продукта, обеспечивающего взаимодействие всех элементов теплоэнергогенерирующего предприятия. Также проведена работа по выборке всех текущих данных за отчетный год и сохранена в нужном для выгрузки в БД формате.**

Ключевые слова: база данных, электронная таблица, БД, диаграмма, учет приборов, программный продукт, диагностика текущей системы учета.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-191-193

I. Введение

Автоматизация технологических процессов на сегодняшний день являет собой одну из концепций управления ими [1], отличительная черта которой – использование информационных технологий. Она предусматривает широкое применение ЭВМ и программно-аппаратного комплекса, что обеспечивает управление информацией, ресурсами и действиями с минимальным участием человека в данных процедурах либо без такового в принципе [2].

Главная задача, которую призвана реализовать проектирование автоматизации процессов – это вывод качественных показателей процессов на принципиально более высокий уровень. Достигается она главным образом благодаря тому, что основным преимуществом автоматизированного режима над ручным является его большая надежность.

Что, в свою очередь, способствует:

– росту производительности;

– ускорению работы;

– увеличению точности и стабильности.

На сегодняшний день автоматизация процессов в мире используется повсеместно – от координирования сложнейших производств до осуществления приобретений в супермаркетах. Направленность компании, равно как и ее масштабы, в данном случае не принципиальны: автоматика буквально пронизывает любую из них. А благодаря использованию процессорного подхода, для всей совокупности процессов применяются единые принципы автоматизации.

Целью данной статьи является рассмотрение возможности проектирования такой системы, включающей структуру базы данных приборов учета, генераторов и их показаний, что является первостепенной задачей при разработке программного обеспечения для контроля и учета целесообразности использования энергоресурсов, минимизации потерь и экономии денежных средств на теплоэнергогенерирующем предприятии [2, 3].

II. Постановка задачи

Для выполнения поставленной цели были определены следующие задачи:

– рассмотреть возможные подходы в вопросе систем учета энергопоказателей, на примере принципа функционирования аналогичных ей существующих или разрабатываемых систем;

– изучить уже имеющихся отчетные документы, которые содержат в себе показания всех приборов учета и генераторов теплоэлектроцентрали за каждый отдельно взятый период;

– спроектировать структуру таблиц базы данных и связей между ними;

– определить метод загрузки имеющихся данных из документов формата «Электронной таблицы» в базу данных.

III. Теория

Хранение информации – одна из важнейших функций компьютера [4]. Одним из распространенных средств такого хранения являются базы данных.

База данных (БД) – совокупность взаимосвязанных, хранящихся вместе данных при наличии такой минимальной избыточности, которая допускает их использование оптимальным образом для одного или нескольких приложений.

Создание базы данных, ее поддержка и обеспечение доступа пользователей к ней осуществляется централизованно с помощью специального программного инструментария – системы управления базами данных[5].

Система управления базами данных (СУБД) – это комплекс программных и языковых средств, необходимых для создания баз данных, поддержания их в актуальном состоянии и организации поиска в них необходимой информации.

Концептуальная модель БД описывает сущности, их свойства и связи между ними; не зависит от конкретной СУБД [4].

Сущность – это реальный или представляемый тип объекта, информация о котором должна сохраняться и быть доступна. В диаграммах сущность представляется в виде прямоугольника, содержащего имя сущности. При этом имя сущности – это имя типа, а не некоторого конкретного экземпляра этого типа. Каждый экземпляр сущности (объект) должен быть отличим от любого другого экземпляра той же сущности [6].

Связь – это графически изображаемая ассоциация, устанавливаемая между двумя сущностями. Связь может существовать между двумя разными сущностями или между сущностью и ей же самой (рекурсивная связь) [6]. Возможны связи на основе отношений:

– один-к-одному;

– один-ко-многим;

– многие-ко-многим.

Таким образом, такое представление данных будет наиболее оптимальным при моделировании системы учета приборов и их показаний.

IV. Результаты экспериментов

После анализа уже существующей системы учета и отчетных документов было принято решение разработать требуемую структуру базы данных, представленную на рис. 1.

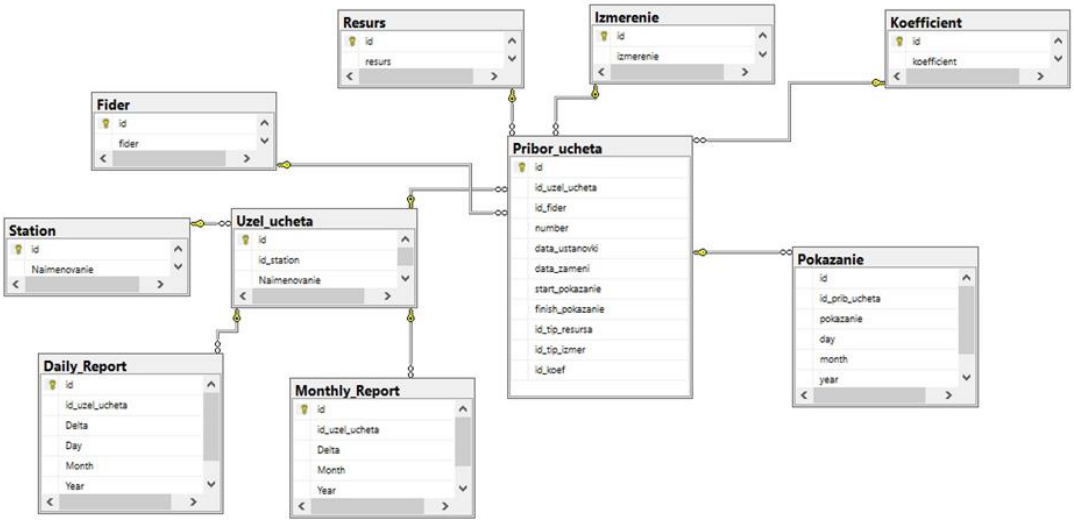


Рис. 1. Структура базы данных

Основной таблицей будет являться таблица «Приборы учета», которая отражает данные по наименованию узла учета, его номер, даты установки и замены, начальное и конечное показания и другие дополнительные сведения, которые необходимы для сопровождения процесса обслуживания приборов учета (установки и замены). Для составления ежемесячного и ежегодного отчетов, которые в свою очередь хранятся в одноименных реестровых файлах, используется таблица «Узел учета», содержащая идентификатор прибора учета. На этом этапе были сформированы сборные файлы, содержащие необходимую информацию об имеющемся оборудовании, придерживаясь структуры базы данных, которая по некоторым параметрам отличается от ранее разработанной информационной модели. Следующим шагом было создание таблицы «Показания», в которую вносятся данные по конкретному прибору учета за конкретный день. Также для некоторых устройств заполняется дополнительный параметр «Время работы», где отображается количество часов работы в режиме автономного и основного питания. Для более удобного хранения и представления информации используются дополнительные таблицы, такие как «Коэффициент», «Ресурс», «Измерения», «Фидер» и «Станция», которые хранят соответствующие данные.

После формирования структуры базы данных была поставлена задача по выгрузке всех имеющихся данных за текущий год. Для этого было принято решение формировать новые файлы формата Excel, которые будут соответствовать конструкции таблиц, а затем преобразовывать их в формат csv для последующей загрузки в БД. Чтобы достичь этой цели были использованы средства автоматизации задач – макросы.

V. Обсуждение результатов

Разработанная структурированная база данных по учету показаний всех счетчиков и иного оборудования ТЭЦ обеспечит безопасное хранение информации, а также позволит оперативно использовать её для формирования требуемых отчетных форм. Такое представление имеющихся сведений способствует:

- уменьшению влияния человеческого фактора;
- сокращению времени обработки данных;
- увеличению точности результатов отчета, а также уменьшению количества ошибок.

В дальнейшем планируется создание программного обеспечения, которое будет взаимодействовать с разработанной базой данных и предоставлять удаленный доступ к управлению информацией.

VI. Выводы и заключение

Исходя из поставленной цели, выполнение данной задачи позволит централизованно выполнять все необходимые задачи по учету показаний ТЭЦ. Опираясь на вышесказанное, можно утверждать, что реализация программной части системы целесообразна, так как подобная архитектура позволит обеспечить гибкость, универсальность и независимость средств реализации программной части модуля учета. Что позволит уменьшить время и увеличить частоту проведения диагностики режимов работы ТЭЦ и сэкономить средства на её выполнение.

Список литературы

1. Гаак В. К., Гаак А. В., Грицай А. С. Повышение экономической эффективности теплоисточников и систем теплоснабжения в современных условиях // Промышленная энергетика. 2017. № 12. С. 14–20.

2. Хамитов Р. Н.,Червенчук И. В., Грицай А. С. Модель хранения и предварительной обработки ретроспективных данных при решении задачи краткосрочного прогнозирования электропотребления // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. № 4 (74). С. 125–131.

3. Толмачев Д. В., Хамитов Р. Н., Грицай А. С., Шафеева О. П., Дорошенко М. С. Характеристика и возможности аналитических систем для построения прогностических моделей электропотребления предприятий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 9. С. 43–50.

4. Автоматизация технологических процессов. URL: https://proiz-teh.ru/at-avtomatizaciya-processov.html (дата обращения: 20.03.2019).

5. Автоматизация технологических процессов. URL: https://proiz-teh.ru/at-avtomatizaciya-processov.html (дата обращения: 20.03.2019).

6. Малыхина М. Базы данных: основы, проектирование, использование. М.: БХВ-Петербург, 2016. 512 с.

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИКВИДОВ

Т. В. Кривальцевич, А. Г. Янишевская
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье рассмотрены основные механизмы формирования неликвидов на примере предприятий радиоэлектронной отрасли. Представлена модель формирования неликвидов, которая взаимосвязана с типовым процессом разработки и производства изделия от получения технического задания до утилизации. Описаны процессы формирования неликвидов на различных этапах, исходя из анализа сложности и вида задач, выполняемых разработчиком. Рассмотрены математические модели и выбрана модель, которая опишет процессы и позволит смоделировать подходы для снижения остатков по комплектующим и материалам на складах предприятий радиоэлектронной отрасли.**

Ключевые слова: неликвиды, ЭКБ, ДСЕ, радиоэлектронная отрасль, промышленное производство.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-194-196

I. Введение

Современные предприятия радиоэлектронной отрасли внедряют автоматизированные системы, осуществляющие поддержку изделия на протяжении всего жизненного цикла. Для обеспечения конкурентоспособности предприятиям необходимо в кратчайшие сроки разработать опытный образец, удовлетворяющий потребностям заказчика, и запустить этот образец в серийное производство. Любое производство сталкивается с накоплением на складах остатков комплектующих деталей, запасных частей, сырья, и других материалов, которые уже не могут использоваться в производстве изделия. Такие остатки на складах называются неликвидами.

Каждое предприятие самостоятельно определяет критерии, по которым материально технические ресурсы следует относить к категории неликвиды. На любом производственном предприятии, организована закупка оборудования, комплектующих и материалов, что, в свою очередь, создает положительную тенденцию для роста запасов, однако некоторые, по различным причинам остаются на складах предприятия и не используются в дальнейшем производстве [1].

Рассмотрим основные причины формирования неликвидов на примере предприятий радиоэлектронной отрасли. Именно данные предприятия переживают в нашей стране, в последнее десятилетие, бурное развитие. Это связано как с исполнением государственного оборонного заказа [2], так и в связи с задачами по увеличению доли гражданской продукции [3]. Быстрый рост номенклатуры продукции заключается в том, что именно радиоэлектронные программно-аппаратные изделия определяют функциональность инженерных систем и различных объектов инфраструктуры.

Можно выделить следующие основные причины формирования неликвидов на предприятиях радиоэлектронной отрасли:

- отказ от запуска изделия в серийное производство, соответственно материалы и/или комплектующие для изготовления изделия остались на складе;
- количественные или номенклатурные ошибки, которые допущены при заказе;
- нерегулярная потребность комплектующих при выполнении заказа;
- истечение срока годности (хранения) комплектующих;
- неоптимальная закупка партий. Поставщик не может или не хочет продавать необходимые комплектующие требуемого количества, тогда на складах остаются излишки, которые в других изделиях не используются.

II. Классификация неликвидов

Неликвиды следует делить на те, что могут быть повторно применены по назначению (или ограниченно применимы, например, только при макетировании) и те, которые нельзя использовать по назначению (истек срок хранения, устаревшая конструкция и т.д.).

В целом структура модели формирования неликвидов одинакова для производства любого вида продукции. В случае производства гражданской продукции наибольший вклад в формирование неликвидов оказывает изменения функциональности (изменения технического задания), в соответствии с ростом потребительских запросов и конкуренцией на рынке.

А в случае производства продукции создаваемой в рамках госзаказа, наибольшие потери возникают вследствие сложной структуры изделия, не оптимальности партии и требований к длительности выпуска изделий (что влечет увеличение рисков снятия комплектующих деталей с производства).

На рис. 1 представлена модель формирования неликвидов на предприятии, которая взаимосвязана с типовым процессом разработки и производства продукции от получения технического задания до утилизации определяемым ГОСТ Р 15.301–2016 [4].

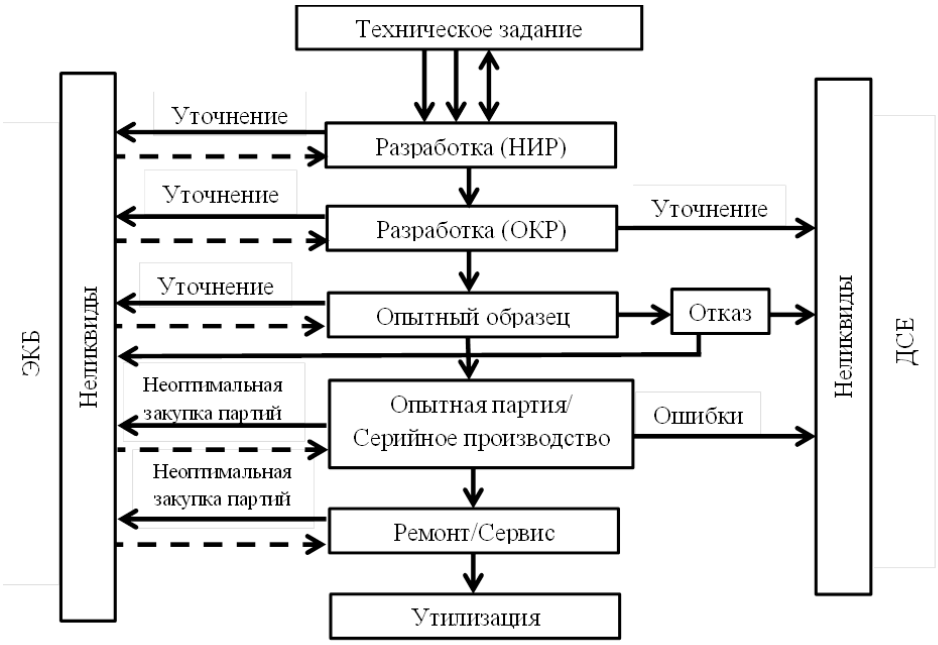


Рис. 1. Модель формирования неликвидов на предприятии радиоэлектронной отрасли

На практике, в ряде разработок исключаются некоторые шаги, которые представлены в модели, например, для выполнения простых задач объединяются научно-исследовательская разработка (НИР) и опытно-конструкторская разработка (ОКР).

Исходя из анализа сложности и вида задач, выполняемых разработчиком, можно описать связи формирования неликвидов на различных этапах:

На этапе научно-исследовательской работы формируется достаточно слабый поток образования неликвидов электронной компонентной базы (ЭКБ), что обусловлено необходимостью изготовления единичных экземпляров макетов. При этом наличие на предприятии базы неликвидов с организацией доступа к такой базе исследователей и разработчиков выполняющих НИР позволит использовать накопившиеся неликвиды из других разработок.

На этапе ОКР происходит уточнение комплектующих деталей, поэтому поток образования неликвидов в ЭКБ увеличивается, а также формируется поток неликвидов деталей и сборочных единиц (ДСЕ). Вследствие заказа неоптимальной партии материалов, количественных и номенклатурных ошибок при заказе деталей, задвоения позиций в справочниках баз, снятия комплектующих деталей с производства, истечения срока годности и т.д.

На этапе разработки опытного образца существует вероятность отказа от запуска изделия в серийное производство или внесение изменений в проектную документацию, таким образом, комплектующие детали, хранящиеся на складах и предназначенные для данной разработки, переходят в категорию неликвиды ЭКБ или ДСЕ.

На этапе производства (опытной партии/серийного производства) формирование потока неликвидов значительно возрастает, вследствие закупки неоптимальной партии комплектующих деталей, количественных или номенклатурных ошибок, задвоения позиций в справочниках баз ЭКБ и ДСЕ, истечение срока годности или хранения.

На этапе эксплуатации (ремонт/сервис) формирование потока неликвидов снижается и образуется в основном из-за закупки неоптимальной партии комплектующих деталей, количественных и номенклатурных ошибок, истечения срока годности или хранения.

Таким образом, на складах предприятий формируются неликвиды в больших количествах, которые ухудшают экономическое состояние промышленного производства, так как они не приносят прибыли, а так же требуют дополнительных затрат.

Для сокращения формирования неликвидов, а так же их реализации предприятию необходимо проводить мероприятия, предупреждающие их образование, которые могут изменяться или дополняться в зависимости от специфики предприятия [5]. Предприятиям необходимо решать проблемы образования неликвидов на всех этапах от разработки до утилизации изделия. Для этого требуется проводить регулярную инвентаризацию на складах, что позволит выявить материалы или комплектующие детали, которые перешли в категорию неликвидов и своевременно принять соответствующие меры по реализации данной категории.

Для эффективной борьбы с механизмами формирования неликвидов, необходимо подобрать детализированную математическую модель, которая опишет процессы и позволит смоделировать подходы для снижения остатков по комплектующим и материалам на складах предприятий радиоэлектронной отрасли.

Известно, что математической моделью или абстрактной моделью называют формализованное описание системы с помощью абстрактного языка. Реализовать эти модели можно, например, с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования системы. Среди математических моделей, по методу их исследования, выделяют аналитические, численные и имитационные модели.

Аналитические модели представляют собой систему математических выражений для решения уравнений выходных параметров функционально зависящих от параметров входных и внутренних.

Численные модели позволяют найти численные решения для определенных параметров модели.

Имитационные модели характеризуются более точным описанием системы, зависящих от внешних и внутренних параметров, которая позволяет сочетать элементы аналитических, компьютерных и аналоговых моделей с помощью последовательности вычислений и графического отображения результатов ее работы воспроизводить (имитировать) процессы функционирования изучаемого объекта при воздействии на него различных (как правило, случайных) параметров.

Для составления модели используют любые математические средства - алгебраическое, дифференциальное и интегральное исчисление, теорию множеств, теорию алгоритмов и т. д. К средствам абстрактного описания систем относятся также языки схем, чертежей, карт и диаграмм, а также ряд других.

Выбор вида модели определяется целью моделирования и особенностями изучаемой системы. При этом тщательный выбор модели позволяет с меньшими временными и материальными затратами ее создать. Для моделирования производственных процессов, более наглядное представление модели, отказ от излишней сложности повысит вероятность её успешного использования на практике.

Подготовив такую модель с помощью системы дифференциальных уравнений планируется приступить к её реализации на языке высокого уровня. При этом для подбора коэффициентов потоков формирования и сбыта неликвидов, возможно применение машинного обучения, по данным конкретно производства.

III. Выводы и заключение

Разработка любого изделия способствует образованию неликвидов, так как это изначально заложено в самом процессе и на всех этапах от разработки до утилизации изделия.

В результате образуются неликвиды по нескольким направлениям:

1. Изменения в проекте опытного образца на разных итерациях разработки.
2. Закупка не оптимальных партий комплектующих элементов формируются лишние запасы на складах.
3. Изменение проектов, которые вызваны снятием с производства тех или иных материалов, формируются лишние запасы комплектующих.

Предприятия должны своевременно решать проблемы образования неликвидов на всех этапах производства изделия. Для описываемой нами системы учета, использования и прогноза изменений количества неликвидов наиболее подходящей является имитационная модель.

Применение имитационной модели позволит эффективно учитывать как внутренние, так и внешние факторы и создать эффективный механизм настройки характеристик системы.

Реализация данной модели, планируется на языке высокого уровня, а для подбора характеристик, возможно применение машинного обучения, по данным конкретно производства.

Список литературы

1. Одинцова М. Неликвиды – неизбежное зло или закономерный результат хозяйственной деятельности. URL: https://sitmag.ru/article/9625-problemy-hozyaystvuyushchego-subekta-pri-vyyavlenii-i-minimizatsii-nelikvidnyh-zapasov-mtr-nelikvidy-neizbejnoe-zlo-ili-zakonomerniy-rezultat-hozyaystvennoy-deyatelnosti. Заглавие с экрана (дата обращения: 10.01.2019).
2. Оборонно-промышленный комплекс России в 2012-2015 годах URL: http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2017/1226/104123038/detail.shtml (дата обращения: 10.01.2019).
3. Ваисова Л. ОПК осваивает гражданскую продукцию URL: https://flb.ru/7/834.html. Заглавие с экрана (дата обращения: 10.01.2019).
4. ГОСТ Р 15.301-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. Введ. 2016-10-31. М.: Стандарт ТИМ ФОРМ, 2016. 12 с.
5. Полевая Е. И. Неликвиды предприятий превращаем в живые деньги // Планово-экономический отдел. Управление предприятием: Профессиональное издание. 2018. № 1. URL: https://www.profiz.ru/peo/1_2018/nelikvidy_predprijatija (дата обращения: 10.01.2019).

УДК 004.056, 004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ВАРИАНТОВ

Е. Ф. Кустов, А. А. Магазев
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В представленной работе рассматривается задача оптимизации состава средств защиты информации, формулируемая в рамках одной марковской модели безопасности. В данной задаче в качестве целевой функции выступает функционал стоимости состава средств защиты, а в качестве допустимого множества решений – наборы средств защиты, обеспечивающие заданное бесперебойное время функционирования информационной системы. В работе обсуждается проблема решения указанной оптимизационной задачи; в частности, анализируется возможность ее решения методом последовательного анализа вариантов. Для сравнения эффективности этого метода был произведен ряд численных экспериментов, результаты которых сравнивались с результатами, полученными прямым перебором. В заключение работы обсуждаются дальнейшие перспективы и направления исследований.**

Ключевые слова: информационная система, угроза безопасности, марковская модель, оптимизация, целочисленное программирование, метод последовательного анализа вариантов.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-197-202

I. Введение

С каждым годом проблема оптимизации выбора эффективных средств защиты информации становится всё острее, и как следствие, возникает потребность в нахождении оптимальных путей, а также наиболее выгодных средств защиты информации. Скорость развития информационных технологий с каждым годом становится всё стремительнее, вследствие чего в информационных системах появляется всё больше уязвимостей, которые могут повлечь за собой нанесение ущерба предприятию. Поэтому на рынке появляются различные способы защиты информации. Следовательно, остро встаёт вопрос об оптимальном выборе средств защиты информации. Эту задачу эффективно можно решить с помощью математического моделирования.

Математическое моделирование играет важную роль в защите информации. Использование различных математических моделей, позволяет дать теоретическое обоснование методов и механизмов защиты информации. Кроме того, математические модели позволяют дать количественную оценку *эффективности* и *надёжности,* которая является важнейшей величиной, для построения надёжной системы защиты информации.

Наиболее интересными являются модели, сформулированные в рамках терминов случайных марковских процессов. Данные модели широко применяются в различных областях информационной безопасности: построение модели угроз безопасности [1], оптимизация выбора средств защиты информации [2], обнаружение кибер-атак на информационную систему [3] и т.д.

В статье [2] рассматривается задача оптимизации комплекса средств защиты информации, сформулированная в рамках одной марковской модели угроз информационной системы. Данная работа является продолжением работы [2]. В частности, мы исследуем способы решения указанной оптимизационной задачи методом последовательного анализа вариантов [4].

II. Постановка задачи

Рассмотрим информационную систему (в дальнейшем просто систему), на которую воздействует n независимых внешних угроз с вероятностями $q_1, q_2, \ldots, q_n$. Предположим, что одновременная реализация более двух угроз невозможна и, кроме того, очередная угроза может проявиться только после успешного отражения предыдущей. Следовательно, в каждый момент времени $t = 0,1,2,\ldots$ система находится в одном из $n + 1$ возможных состояний: $s_0, s_1, \ldots, s_n, s_{n+1}$. Состояние s_0 называется безопасным, так как на систему не воздействует ни одна из угроз. На систему в состоянии s_i произвела воздействие i-я угроза, где $i = 1,\ldots,n$. При этом на следующем шаге возможно два исхода события:

1) Данная угроза будет успешно отражена с вероятностью r_i и система вернется в состояние s_0;
2) Данная угроза с вероятностью $\bar{r}_i = 1 - r_i$ приведет к выводу системы из строя.

В данном случае мы будем считать, что система переходит в состояние s_{n+1}.

Граф состояний системы приведен на рис. 1.

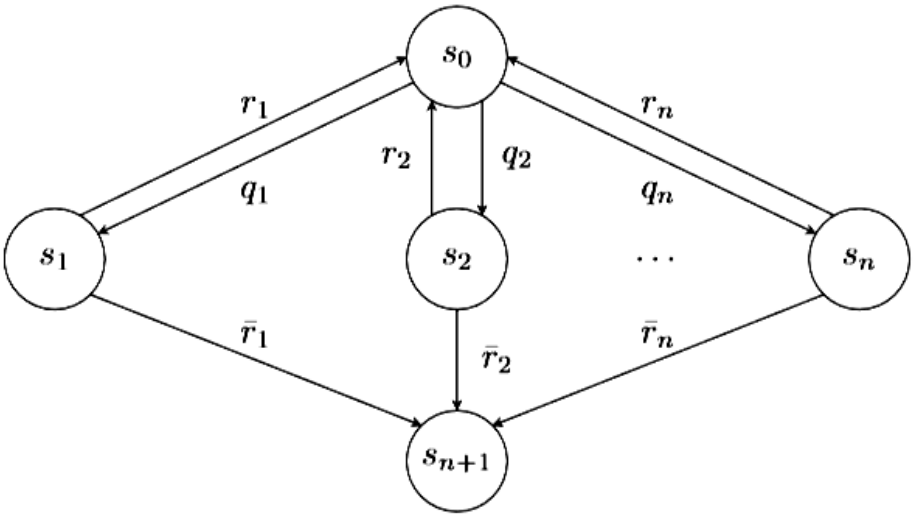


Рис. 1. Граф состояний системы

В динамике система представляет собой марковскую цепь с матрицей переходных вероятностей

$$\Pi = \begin{pmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & \dots & q_n & 0 \\ r_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \overline{r_1} \\ r_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & \overline{r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_n & 0 & 0 & \dots & 0 & \overline{r_n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $q_0 = 1 - \sum_{i=1}^{n} q_i$.

Вероятность $p_i(t)$ означает, что система находится в момент времени t в состоянии s_i. Эта вероятность определяется через вероятности состояний системы в момент времени $t-1$ согласно формуле

$$p_i(t) = \sum_{j=0}^{n+1} p_j(t-1)\Pi_{ji}.$$

В начальный момент времени $t = 0$ система находится в безопасном состоянии s_0, то есть $p(0) = (1,0,...,0)$.

Как было показано в работе [2], вероятность безопасного состояния системы в произвольный момент времени t выражается следующей формулой:

$$p_0(t) = \frac{1}{w}\left(\frac{q_0 + w}{2}\right)^{t+1} - \frac{1}{w}\left(\frac{q_0 - w}{2}\right)^{t+1}.$$

Здесь положительная величина w определяется как $w^2 = q_0^2 + 4\sum_{i=1}^{n} q_i r_i$.

Временем релаксации τ назовем время, за которое вероятность безопасного состояния системы уменьшается в два раза (по сравнению с моментом времени $t = 0$). Из равенства $p_0(0)/p_0(\tau) = 2$ получаем

$$\tau = \log_{\frac{q_0+w}{2}} \frac{w}{2} - 1. \quad (1)$$

Пусть T – некоторый фиксированный момент времени. Нас будут интересовать условия, при которых вероятность нахождения системы в безопасном состоянии на временах, меньших или равных T, будет относительно большой. Перепишем неравенство $\tau \geq T$, используя формулу (1), и решим его относительно w. Получаем

$$w \geq 2x^* - q_0, \tag{2}$$

где x^* – вещественный корень уравнения

$$x^{T+1} - x + \frac{q_0}{2} = 0, \tag{3}$$

принадлежащий отрезку $[q_0,1]$. Подставляя в (2) выражение для параметра w, получаем ограничение на значения параметров защиты r_i:

$$\sum_{i=1}^{n} q_i r_i \geq x^*(x^* - q_0). \tag{3}$$

Предположим, что имеется m различных средств защиты, предотвращающих угрозы информационной безопасности. Каждое средство защиты связанно с соответствующей булевой переменной, принимающей значения 1 или 0. Следовательно, все средства защиты можно представить в виде m – мерного булевого вектора $\mathbf{x} = (x_1, \ldots, x_m) \in \{0,1\}^m$.

Обозначим вероятность успешного парирования α-ым средством защиты i-ой угрозы через $r_{i,\alpha}$, где $1 \leq \alpha \leq m$. В один и тот же момент времени сразу несколько средств защиты могут блокировать данную угрозу, поэтому вероятность отражения всеми средствами защиты представим в виде суммы m совместных событий:

$$r_i(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^{m} (-1)^{k-1} \sum_{\alpha_1 < \alpha_2 < \cdots < \alpha_n} (r_{i,\alpha_1} x_{\alpha_1})(r_{i,\alpha 2} x_{\alpha_2}) \ldots (r_{i,\alpha_n} x_{\alpha_n}). \tag{4}$$

Пусть c_α – стоимость α- го средства защиты. Рассмотрим целевую функцию C: $\{0,1\}^m \to \mathbf{R}$:

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha=1}^{m} c_\alpha x_\alpha. \tag{5}$$

Значение данного функционала на векторе $\mathbf{x}$ даёт стоимость соответствующей конфигурации системы защиты.

Используя фиксированный момент времени $T > 0$ можно ограничить значения параметров $r_i(\mathbf{x})$ областью допустимых значений $R_T(q_1,\ldots, q_n) \subset \mathbf{R}^n$, при которых время релаксации будет больше, либо равно T. Также естественным ограничением будет условие сведения стоимости конфигурации к минимуму, то есть $C(\mathbf{x}) \to \min$. Принимая во внимания указанные ограничения, получаем следующую оптимизационную задачу:

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha=1}^{m} c_\alpha x_\alpha \to \min, \ \mathbf{x} \in X, \tag{6}$$

где

$$X = \{x \in \{0,1\}^m : \sum_{i=1}^{n} q_i r_i(x) \geq x^*(x^* - q_0)\}. \tag{7}$$

Здесь $q_0 = 1 - \sum_{i=1}^{n} q_0$, а x^* представляет собой вещественный корень уравнения (3), принадлежащий отрезку $[q_0,1]$.

Наиболее прямой способ решить данную оптимизационную задачу – прямой перебор. Очевидно, что при этом необходимо выполнить 2^m итераций, где m – число рассматриваемых средств защиты. Чтобы снизить количество итераций и ускорить вычисления, применим *метод последовательного анализа вариантов* [4].

III. Теория

Метод последовательного анализа вариантов основан на пошаговом конструировании решений и отсеве в процессе такого конструирования тех, которые не могут быть достроены до оптимальных.

Напомним некоторую терминологию. Всякий вектор $\mathbf{x} = (x_1, \ldots, x_m) \in \{0,1\}^m$ будем называть *решением*. Множество всех решений обозначим Ω. Решение будем называть *допустимым*, если оно удовлетворяет неравенству (7). Множество всех допустимых решений обозначим Ω_f. Рассмотрим вектор $\mathbf{x}_{(p)} = (x_1, \ldots, x_p)$, $p < m$. Если он может быть достроен до допустимого решения $(x_1,\ldots, x_p, x_{p+1}, \ldots, x_m)$, то будем называть $\mathbf{x}_{(p)}$ *допустимым частным решением*.

Для решения оптимизационной задачи (6) – (7) необходимо построить набор σ *элиминирующих тестов* ξ_i, которые производят отсев частичных условий, которые не могут быть достроены до допустимых. В такой набор обязательно входят тест ξ_0 – анализ допустимости решений, который сводится к проверке неравенства (7), и тест ξ_1 – сравнение допустимых решений по значению целевой функции (6). *Оценкой* каждого частичного решения $\mathbf{x}_{(p)}$ назовём число $\gamma_C(\mathbf{x}_{(p)})$:

$$\gamma_C(x_{(p)} \le \min\{C(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \Omega\}. \tag{8}$$

Пусть C^* – верхняя граница (рекорд) для минимума задачи (6) – (7). На первых шагах допустим, что рекорд равен бесконечности, а в дальнейшем положим, что он равен значению целевой функции на наилучшим найденном допустимом решении. Тогда дополнительный элиминирующий тест ξ_2 для всякого множества частичных решений h будет задаваться соотношением:

$$\xi_2(h) = \{\mathbf{x}_{(p)} \mid \gamma_C(\mathbf{x}_{(p)}) > C^*\}. \tag{9}$$

Рассмотрим еще один элиминирующий тест ξ_3, который основан на анализе допустимых частичных решений. Перепишем неравенство (7) в виде $g(\mathbf{x}) \le 0$. Очевидно, что для функции $g(\mathbf{x})$ существует нижняя граница $\gamma_g(\mathbf{x}^0_{(p)})$ её значений на множестве $\Omega_f(\mathbf{x}^0_{(p)})$, где $\mathbf{x}^0_{(p)}$ – частичное решение, полученное из $\mathbf{x}_{(p)}$. Следовательно, если имеет место неравенство $\gamma_g(\mathbf{x}^0_{(p)}) > 0$, то частичное решение $\mathbf{x}^0_{(p)}$ *не может быть достроено* до допустимого решения. Исходя из этого, мы можем определить тест ξ_3 следующим условием:

$$\xi_3(h) = \{\mathbf{x}_{(p)} \mid \mathbf{x}_{(p)} \in h, \max \gamma_g(\mathbf{x}_{(p)} > 0)\}. \tag{10}$$

В нашем случае функцию $g(\mathbf{x})$ можно представить в виде (см. формулу (4)):

$$g(\mathbf{x}) = g_1(\mathbf{x}) - g_2(\mathbf{x}), \tag{11}$$

где все $g_1(\mathbf{x})$ и $g_2(\mathbf{x})$ являются неубывающими функциями. Тогда, если для частичного решения $\mathbf{x}^0_{(p)}$ выполняется:

$$\gamma_g(\mathbf{x}_{(p)}) = g_1(x_1^0, \ldots, x_p^0, 0, \ldots, 0) - g_2(x_1^0, \ldots, x_p^0, 1, \ldots, 1) > 0,$$

то его следует исключить из списка согласно тесту ξ_3, так как его невозможно достроить до допустимого.

Решение задачи можно интерпретировать, как продвижение по *дереву решений*, где узлами будут являться частичные решения, причём висячими узлами являются полные решения (см. [4]).

IV. Результаты экспериментов

Основываясь на описанной выше теории, нами была написана программа на языке C++, решающая оптимизационную задачу (6)–(7). На вход программы подавались следующие данные:

- m – исходное число имеющихся средств защиты;
- n – количество угроз безопасности информационной системы;
- q_i – вероятности реализации угроз;
- T – верхняя граница времени релаксации системы;
- r_{i,α_n} – вероятности отражения угроз средствами защиты;
- c_α – стоимости средств защиты.

На выходе программа выдает вектор **x** – набор средств защиты, который удовлетворяет набору элиминирующих тестов σ, а также $C_{\min}$ – минимальную стоимость набора средств защиты.

С помощью разработанной нами программы был проведен ряд численных экспериментов, оценивающих эффективность метода последовательного анализа вариантов по сравнению с методом полного перебора. Для этого программа запускалась со значениями параметра m из диапазона от 5 до 16. Остальные переменные задавались случайно с помощью стандартной функции **rand** библиотеки **cstdlib**. В целях получения более объективных результатов, для каждого m было проведено 5 независимых измерений, при каждом из которых остальные входные параметры задачи задавались случайно. После проведения каждой серии экспериментов для всякого фиксированного значения m было вычислено среднее значение числа требуемых для решения задачи итераций и его дисперсия. Полученные результаты представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Кол-во средств защиты *m*	**Кол-во итераций при прямом переборе**	**Среднее число итераций при методе ПАВ**	**Дисперсия числа итераций при методе ПАВ**
5	32	38	87
6	64	59	676
7	128	123	2071
8	256	224	19315
9	512	372	45042
10	1024	717	397303
11	2048	1258	2145988
12	4096	2791	1660622
13	8192	4303	11149851
14	16384	2819	2379965
15	32768	8793	35255705
16	65536	11064	50953893

Для иллюстрации мы также приводим графики числа итераций при полном переборе и среднего числа итераций при методе последовательного анализа вариантов.

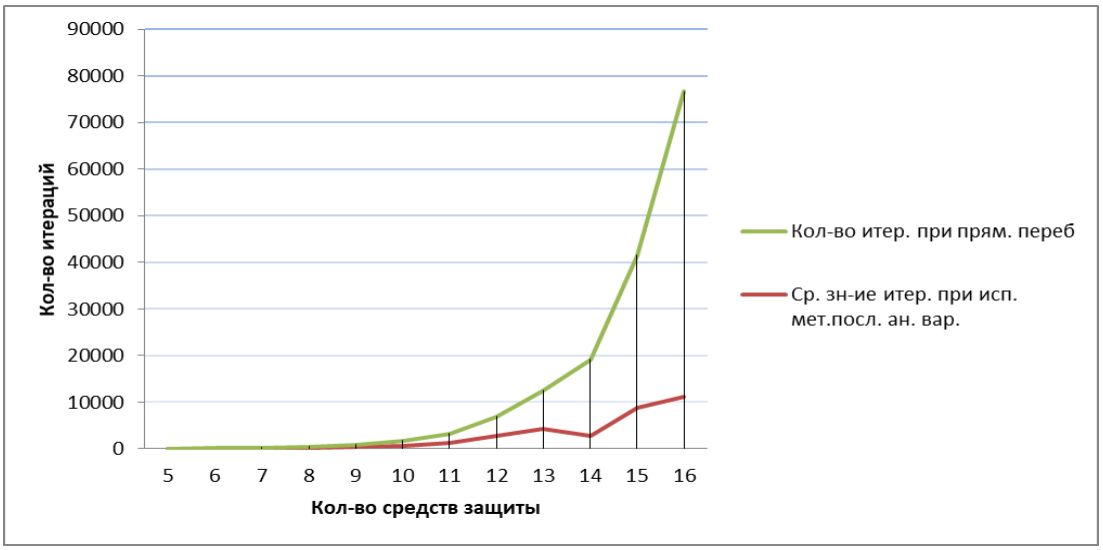


Рис. 2. Сравнение числа итераций при прямом переборе и с использованием метода последовательного анализа вариантов

Как видно из приведённого выше графика число итераций, требуемое для решения оптимизационной задачи (6)–(7), при методе последовательного анализа вариантов меньше чем при методе полного перебора, причем эта разница с ростом m становится более выраженной. Исходя из этого, можно предположить, что метод последовательного анализа вариантов более эффективен для поиска оптимальной конфигурации СЗИ, в особенности, при больших значениях m.

V. Обсуждение результатов

Исходя из представленных выше результатов эксперимента, можно сделать вывод, что метод последовательного анализа вариантов даёт количественный выигрыш, и на практике использование данного метода целесообразно. Тем не менее, для более точных оценок необходимо провести дальнейшие теоретические исследования с целью более строгого анализа зависимости числа итераций от m при применении описанного нами метода.

VI. Выводы и заключение

В представленной работе была рассмотрена оптимизационная задача (6)–(7). Оптимизационная задача формулировалась в рамках марковской модели угроз, исследованной в работе [2]. Произведён численный эксперимент для оценки эффективности метода последовательного анализа вариантов. Эффективность данного метода заключается в выигрыше количества итераций, относительно метода прямого перебора вариантов. Было вычислено средние значение количества итераций и дисперсия выборки. На основе дисперсии, можно предположить, что результаты выполнения программы сильно зависят от совокупности случайных переменных, поданных на вход.

Список литературы

1. Щеглов К. А., Щеглов А. Ю. Марковские модели угрозы безопасности информационной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. Автоматика. Вычислительная техника. 2015. № 12 (58). С. 957–965.

2. Magazev A., Tsyrulnik V. Optimizing the selection of information security remedies in terms of a Markov security model // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. 2019. Vol. 1096. 012160. DOI:10.1088/1742-6596/1096/1/012160.

3. Гаврилова Е. А. Исследование методов обнаружения сетевых атак // Научные записки молодых исследователей. Автоматика. Вычислительная техника. 2017. № 4 (56). С. 55–58.

4. Ковалёв М. М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1977. 193 с.

УДК 004.056, 004.942

ОБ ОЦЕНКЕ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ПОДВЕРГАЮЩЕЙСЯ УГРОЗАМ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. А. Магазев, А. А. Касенов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В работе изучается модель угроз, воздействующих на информационную систему. Модель представлена на языке случайных марковских процессов и описывает функционирование информационной системы как последовательность воздействий и отражений угроз. В результате исследования были получены явные аналитические формулы для среднего времени жизни информационной системы. Информационная система в свою очередь представлена структурной схемой с последовательным и параллельным соединением её элементов. Рассмотрим более подробно каждое соединение в частности. В первом случае, в случае последовательного соединения, при выводе из строя одного элемента - вся система выходит из строя. Во втором же случае для вывода из строя всей информационной системы необходимо чтобы все элементы такой системы вышли из строя. В дальнейшем такую систему можно сколько угодно усложнять.**

Ключевые слова: информационная система, угроза безопасности, марковский процесс.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-202-207

I. Введение

Моделирование в рамках информационной безопасности является одним из базовых методов в рамках информационной безопасности. Ключевым недостатком альтернативного метода – метода натурных испытаний – является его высокая стоимость, а также трудоемкость. Также метод натурных испытаний не даёт теоретического обоснования методов защиты информации.

В настоящей работе мы продолжаем исследование одной марковской модели угроз информационной безопасности, предложенной в статьях [1, 2], и частично проанализированной в работе [3].

II. Постановка задачи

Рассмотрим модель, в которой на информационную систему воздействует n независимых внешних угроз с вероятностями $q_1, q_2, \ldots, q_n$. При этом $\sum_{i=1}^{n} q_i < 1$. Для упрощения расчетов примем во внимание следующие два допущения.

1. Ситуацию с одновременным воздействием нескольких угроз будем считать невозможным.
2. Очередная угроза может произойти только в случае успешного парирования предыдущей.

В соответствии с этим в каждый момент времени $t = 0, 1, 2, \ldots$ система находится в одном из $n + 1$ возможных состояний: $s_0, s_1, \ldots, s_n, s_{n+1}$. В состоянии s_0, называемом *безопасным*, ни одна из угроз не реализуется. Состояние s_i , где $i = 1, \ldots, n$, характеризуется воздействием i-й угрозы. При этом в последующий момент времени имеется две альтернативы: либо данная угроза будет успешно отражена с вероятностью r_i и система вернется в состояние s_0, либо с вероятностью $\bar{r}_i = 1 - r_i$ эта угроза приведет к выводу системы из строя. В последнем случае мы будем считать, что система переходит в состояние

s_{n+1}. Граф состояний системы приведен на рис. 1.

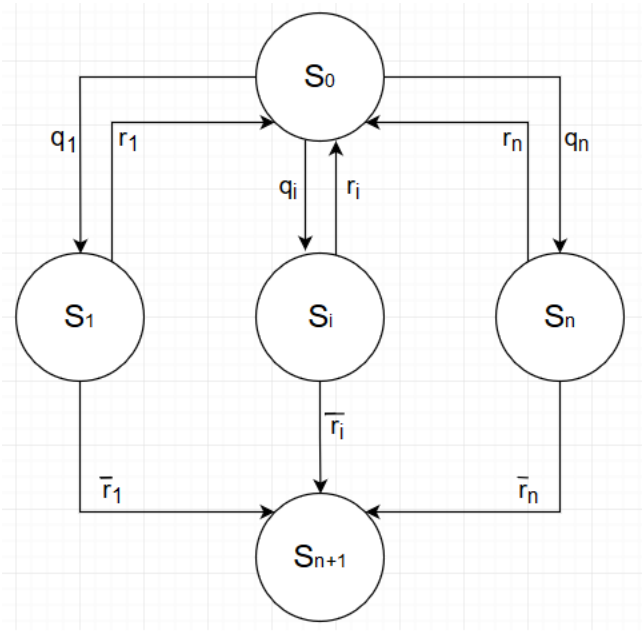


Рис. 1. Граф состояний модели.

Известно, что вероятности нахождения системы в i-ом состоянии вычисляется следующим образом:

$$p_i(t) = \sum_{j=0}^{n} \pi_{ij} p_j(t-1), \tag{1}$$

где π_{ij} – вероятность перехода системы из состояния s_j в состояние s_i. Матрица переходных состояний данной модели выглядит следующим образом:

$$\Pi = \begin{pmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & \ldots & q_n & 0 \\ r_1 & 0 & 0 & \ldots & 0 & \overline{r_1} \\ r_2 & 0 & 0 & \ldots & 0 & \overline{r_2} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ r_n & 0 & 0 & \ldots & 0 & \overline{r_n} \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для краткости было введено обозначение $q_0 = 1-\sum_{i=1}^{n} q_i$. Также является очевидным, что в начальный момент времени вероятности нахождения системы в каждом из состояний выглядят следующим образом:

$$p_0(t)=1,\ \ p_1(t)=p_2(t)=\ldots=p_n(t)=0,\ \ p_{n+1}(t)=0 \tag{2}$$

В справедливости формулы (2) можно убедиться, воспользовавшись выражением (1). Выражение (1) представляет собой рекуррентную формулу, выражающую вероятность состояния s_i через вероятности состояний системы в предыдущий момент времени. Для практических целей более удобными являются явные выражения для вероятностей $p_i(t)$, рассматриваемые как функции времени t. Ниже приведен вид функции $p_0(t)$:

$$p_0(t)=\frac{1}{w}\left(\frac{q_0+w}{2}\right)^{t+1}-\frac{1}{w}\left(\frac{q_0-w}{2}\right)^{t+1} \tag{3}$$

В формуле (3) вводится параметр w для упрощения выражения. Параметр w является неотрицательным и вычисляется по следующей формуле:

$$w^2=q_0^2+4\sum_{i=1}^{n} q_i r_i.$$

Используя выше описанную модель, можно собрать сложную систему, состоящую из двух таких элементов. Рассмотрим два примера такого сочетания моделей.

1. Две подсистемы объедены в общую систему с условием, что при переходе одной из подсистем в конечное состояние s_{n+1}, вся система выходит из строя. Такая система будет считаться системой с последовательным соединением. Схемотичное изображение данной модели приведено на рис. 2.

2. Две подсистемы объедены в общую систему, условием выхода из строя которой является переход в конечное состояние s_{n+1} каждой из составляющих подсистем. Такую систему назовём системой с параллельным соединением. Данная модель схемотично приведена на рис. 3.

Построим схематичные изображения для параллельного соединения на рис. 2, и последовательного соединения на рис. 3 соответственно.

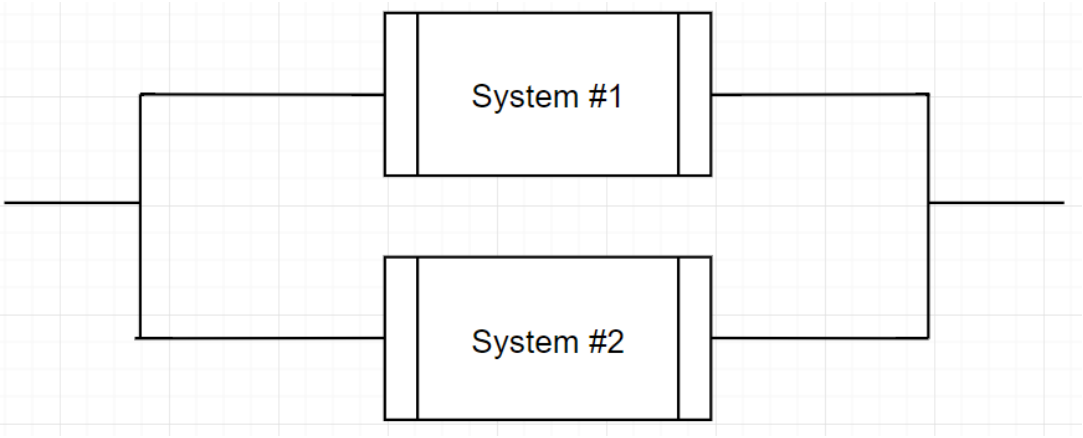


Рис. 2. Схематичное изображение системы с параллельным соединением

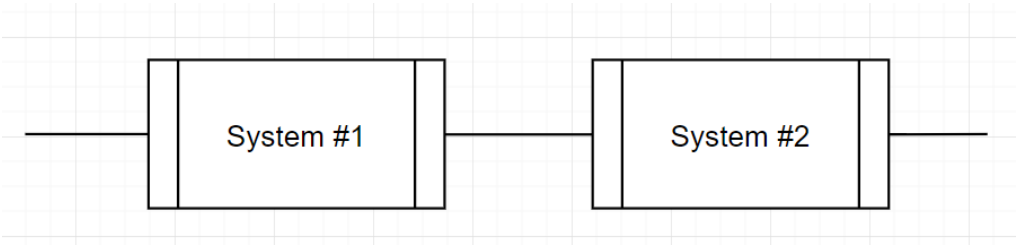


Рис. 3. Схематичное изображение системы с последовательным соединением

Для дальнейшего анализа необходимо построить графы и матрицы связности для систем с последовательным и параллельным соединениями.

Далее будем рассматривать систему с параллельным соединением. Построим граф состояний такой системы. Для построения такого графа необходимо понимать, что при противодействии одной угрозе, другая в этот же момент времени может подействовать на другую систему. Также введем новую переменную $\bar{q}_i = 1 - q_i$.

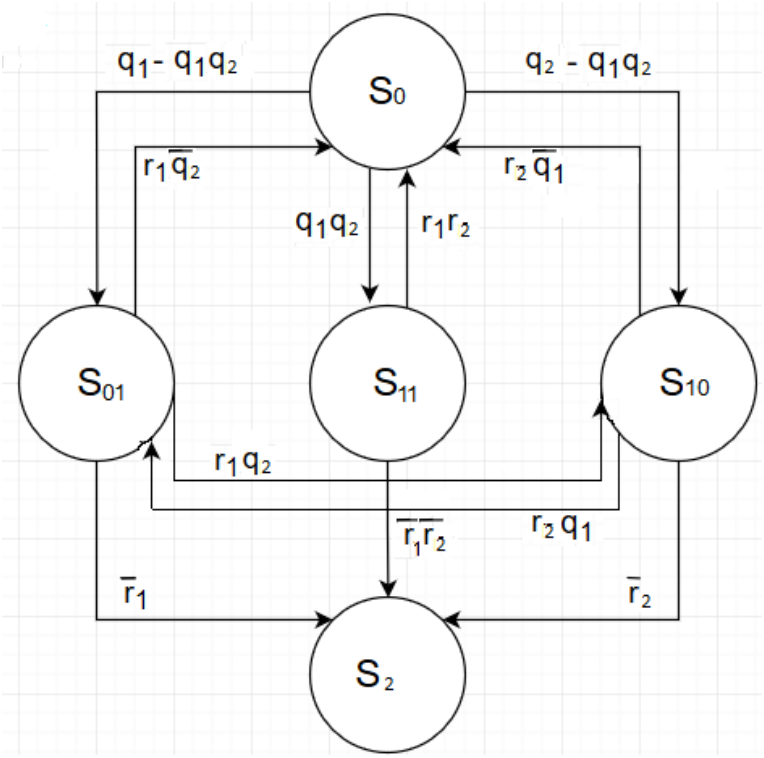


Рис. 4. Граф состояний модели с параллельным соединением

На основе имеющихся графов построим матрицы связности для обоих систем.

$$\Pi_{пар} = \begin{pmatrix} q_0 & q_1 - q_1 q_2 & q_2 - q_1 q_2 & q_1 q_2 & 0 \\ r_1 \bar{q}_2 & 0 & r_1 q_2 & 0 & \bar{r}_1 \\ r_2 \bar{q}_1 & r_2 q_1 & 0 & 0 & \bar{r}_2 \\ r_1 r_2 & 0 & 0 & 0 & \bar{r}_1 \bar{r}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Глядя на матрицу переходных вероятностей, приведенную в формуле (4), очевидно, что вычисления путем перемножения матрицы на саму себя будет являться довольно трудоемким процессом. Необходимо попытаться найти более простые пути вычисления, например, используя вышеизложенные формулы для каждой из подсистем, таким образом найти прямую зависимость систем с параллельным и последовательным соединениями через их составляющие простые подсистемы.

III. Теория

Временем жизни T системы назовем время, за которое она перейдет в конечном состоянии s_{n+1}. Другими словами, время жизни – это число переходов системы между состояниями, до тех пор, пока она не окажется в состоянии s_{n+1}. Ясно, что T – это дискретная случайная величина, подчиненная некоторому закону распределения.

Закон распределения для времени жизни нетрудно выписать, используя формулу (3) для вероятности безопасного состояния $p_0(t)$. Обозначим $P(T)$ вероятность перехода системы в конечное состояние s_{n+1} ровно за T шагов. С помощью графа переходов, изображенного на рис. 1, видно, что система может оказаться в состоя-

нии s_{n+1} за Т шагов только в том случае, если в момент времени $t = T - 2$ она находилась в безопасном состоянии s_0. Так как вероятность этого события равна $p_0(T - 2)$, для вероятности $P(T)$ получаем:

$$P(T) = p_0(T-2)\sum_{i=1}^{n} q_i(1-r_i)$$

С учетом (3) формулу для функции $P(T)$ можно записать следующим образом:

$$P(T) = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i(1-r_i)}{w}\left[\left(\frac{q_0+w}{2}\right)^{T-1} - \frac{1}{w}\left(\frac{q_0-w}{2}\right)^{T-1}\right].$$

Согласно данному нами определению время жизни есть величина равная:

$$\langle T \rangle = \sum_{T=2}^{\infty} P(T)T.$$

Аналогично напишем формулы для среднего времени жизни системы с параллельным и последовательным соединениями:

$$\langle T_{пар} \rangle = \sum_{T=2}^{\infty} P_{пар}(T)T, \tag{5}$$

$$\langle T_{посл} \rangle = \sum_{T=2}^{\infty} P_{посл}(T)T. \tag{6}$$

Через вероятности $P_1(T)$ обозначим вероятности перехода подсистемы 1 в конечное состояние s_{n+1} ровно за T шагов. Аналогично для $P_2(T)$. Остается необходимым выразить вероятности $P_{пар}(T)$ и $P_{посл}(T)$ через вероятности $P_1(T)$ и $P_2(T)$. Для этого рассмотрим функцию распределения $F(T) = \sum_{i=1}^{T} P(T)$. Воспользуемся определением функции распределения:

$$P_{пар}(T) = F_{пар}(T) - F_{пар}(T-1),$$

$$P_{посл}(T) = F_{посл}(T) - F_{посл}(T-1).$$

Используя известные функции закона распределения, приведенные в [4], получаем следующие формулы:

$$F_{пар}(T) = F_1(T)F_2(T) = \sum_{i=2}^{T} P_1(i)\sum_{i=2}^{T} P_2(i), \tag{7}$$

$$F_{посл}(T) = 1 - F_1(T)F_2(T) = 1 - \sum_{i=2}^{T} P_1(i)\sum_{i=2}^{T} P_2(i). \tag{8}$$

Подставляем (7) и (8) в (5) и (6) соответственно и получаем:

$$< T_{пар} >= \sum_{T=2}^{\infty} T\left[\sum_{i=2}^{T} P_1(i)\sum_{i=2}^{T} P_2(i) - \sum_{i=2}^{T-1} P_1(i)\sum_{i=2}^{T-1} P_2(i)\right] \tag{9}$$

$$< T_{посл} >= \sum_{T=2}^{\infty} T\left[(1 - \sum_{i=2}^{T} P_1(i)\sum_{i=2}^{T} P_2(i)) - (1 - \sum_{i=2}^{T-1} P_1(i)\sum_{i=2}^{T-1} P_2(i))\right] \tag{10}$$

Также из формул (9) и (10) очевидно следующее свойство:

$$< T_{посл} > + < T_{пар} >=< T_1 > + < T_2 >. \tag{11}$$

Для проверки подставим (5), (6) в формулу (11):

$$\sum_{T=2}^{\infty} P_{посл}(T)T + \sum_{T=2}^{\infty} P_{пар}(T)T = \sum_{T=2}^{\infty} P_1(T)T + \sum_{T=2}^{\infty} P_2(T)T.$$

Для справедливости равенства (19) достаточно понимать, что $P_{посл}(T)$ и $P_{пар}(T)$ есть минимумы и максимумы по выборке от $P_1(T)$ и $P_2(T)$.

IV. Результаты экспериментов

Дабы убедиться в справедливости формулы (10) был написан набор подпрограмм при помощи программы математического моделирования “MATLAB”. Набор программ включает в себя следующие функции: “GetNextState” – определяет следующие состояние системы, “LifeTime” – считает время жизни, “AverageLifeTime” – считает среднее время жизни. На вход программы необходимо подать только значения вероятностей внешних угроз q и вероятности их противодействия r, а также количество итераций, число которых чем больше, тем выше точность вычисляемых данных. На выходе нашего модуля мы имеем средние время жизни $\langle T_{посл} \rangle$ и $\langle T_{пар} \rangle$, полученные экспериментальным путем. Эти данные можно использовать для сравнения с данными, полученными в формулах (5) и (6).

ТАБЛИЦА 1
СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ.

q_1	q_2	r_1	r_2	$\langle T_{посл} \rangle$ теор	$\langle T_{посл} \rangle$ практ	$\langle T_{пар} \rangle$ теор	$\langle T_{пар} \rangle$ практ	Кол-во итераций
0.2	0.6	0.8	0.3	3.6240	3.6237	30.1800	30.1700	40000
0.5	0.5	0.5	0.5	3.6800	3.6776	8.3200	8.2999	
0.7	0.3	0.3	0.7	3.1865	3.1900	14.7274	14.8211	
0.9	0.9	0.1	0.1	2.0489	2.0478	2.6424	2.6460	
0.9	0.9	0.9	0.9	11.0899	11.1645	31.1323	31.1485	

V. Обсуждение результатов

Полученные теоретические и практические значения, приведенные в табл. 1, являются очень близкими. Для более точного сравнения необходимо большее количество итераций, что является довольно трудозатратным, что снова говорит нам о сложности практических вычислений и необходимости получения явных выражений.

К сожалению, полученная итоговая формула есть бесконечная сумма, что несомненно в итоге облегчает нам вычисления по сравнению с практическими исчислениями, но всё же имеется надежда, что формулы (9) и (10) можно будет свернуть в более простое выражение.

VI. Выводы и заключение

Целью данной работы было получить явное выражение для составных систем, состоящих из простых подсистем. Было рассмотрено два основных варианта: с последовательным и параллельным соединениями. Имея полученные выше выражения, мы можем решать любые сложные системы, просто разбивая их на подсистемы, описанные в рамках данной работы. В дальнейшем хотелось бы усложнять нашу модель, убирая допущения в первой главе, чем мы сможем как можно сильнее приблизить нашу модель к действительности. Но и на данном этапе мы уже имеем модель, приближенно, но всё же дающую нам результаты, схожие с действительностью.

Список литературы

1. Клименко Е. С., Росенко А. П. Марковская модель оценки влияния внутренних угроз на безопасность конфиденциальной информации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2007. Т. 76, № 4. С. 123–126.

2. Росенко А. П. Математическое моделирование влияния внутренних угроз на безопасность конфиденциальной информации, циркулирующей в автоматизированной информационной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. Т. 85, № 8. С. 71–81.

3. Магазев А. А., Цырульник В. Ф. Исследование одной марковской модели угроз безопасности компьютерных систем // Модел. и анализ информ. систем. 2017. № 24:4. С. 445–458.

4. Положинцев Б. И. Теория вероятности и математическая статистика. Введение в математическую статистику: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. 95 с.

УДК 004.91

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ ГРУППЫ СТАНКОВ С ЧПУ

Д. С. Мальгавко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Цель – повышение эффективности работы участков станков с ЧПУ, за счет использования систем автоматизации планирования загрузки. Проведен анализ потерь времени. Предложена методика и разработана система автоматизации составления производственных расписаний работы группы станков с ЧПУ.**

Ключевые слова: ЧПУ, планирование, расписание, оптимизация, потери времени.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-208-211

I. ВВЕДЕНИЕ

Для крупных машиностроительных организаций характерна такая система планирования производства, при которой загрузка конкретных участков определяется исходя, с одной стороны, из суммарной трудоемкости изготовления деталесброчных единиц (ДСЕ), с другой стороны, из производственной мощности участка. При этом оперативно реагировать на изменение производственной ситуации на конкретном участке в цехе (несвоевременная разработка управляющих программ для станков с ЧПУ, отсутствие заготовок, выход оборудования из строя и т. п.) невозможно. Как правило, для учета подобных обстоятельств, просто увеличивается нормативная трудоемкость изготовления ДСЕ. Таким образом, не исключены ситуации, когда современное дорогостоящее оборудование простаивает.

Одним из основных путей повышения коэффициента загрузки оборудования является составление производственного расписания его работы, контроль выполнения и его оперативная корректировка [1]. Эта задача является достаточно сложной, так как требуется учитывать большое количество условий и ограничений. В этом связи разработка и внедрение методик и систем автоматизации составления производственного расписания имеет большую актуальность. В качестве варианта такой методики предлагается решение, реализованное в АО «ОмПО «Иртыш».

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо было решить следующие задачи:
– провести анализ потерь времени, выбрать критерий эффективности системы автоматизации,
– разработать алгоритм методики оптимизации плана загрузки оборудования,
– разработать систему автоматизации планирования загрузки оборудования,
– провести опытную эксплуатацию системы.

III. ТЕОРИЯ

Время выполнения деталеоперации включает в себя время наладки, машинное и время снятия-установки (рис. 1).

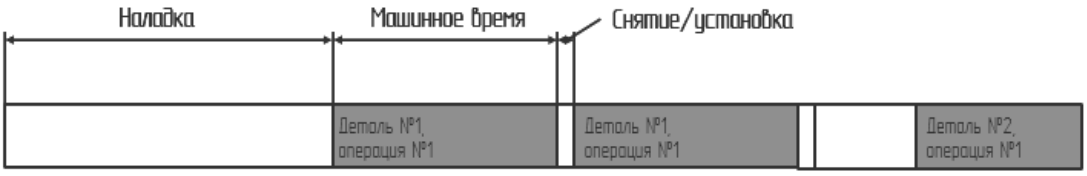


Рис. 1. Компоненты времени изготовления на станке с ЧПУ

При этом, если после выполнения деталеоперации за ней следует такая же деталеоперации, то время наладки не требуется, а если другая, то необходимо проводить наладку.

Анализ причин простоев на типовом участке станков с ЧПУ показал, что наиболее существенной составляющей потерь времени являются несогласованный запуск операций в пределах группы станков. Так как груп-

пу станков сопровождает один наладчик в случаях, когда одновременно на нескольких станках группы требуется наладка, возникают простои (рис. 2).

Рис. 2. Пример несогласованного запуска операций

Очевидно, что критерием эффективности системы является время простоя станка группы, которое должно стремиться к минимальному значению. При этом, учитывая, что само время наладки изменять нельзя, время простоя станков возможно изменять только за счет варьирования порядка запуска деталеопераций.

Исходными данными для планирования служат:

1. План изготовления ДСЕ.
2. Данные о движении ДСЕ на предыдущих пунктах технологических маршрутов. На АО ОмПО «Иртыш» действует система штих-кодирования маршрутных листов, сопровождающих партии ДСЕ, что позволяет вести учет движения ДСЕ между участками и цехами. В результате, имеется возможность получать данные об обеспеченности конкретного участка заготовками.
3. Нормативная трудоемкость изготовления ДСЕ, которая включает время машинное, наладки, снятия-установки для каждой деталеоперации. На АО ОмПО «Иртыш» источником этих данных является PDM-системы «Лоцман: PLM». Каждая управляющая программа проходит процедуру внедрения, для чего разработчик размещает программу в системе и запускает бизнес-процесс, который включает технолога цеха, нормировщика цеха, контроллера ОТК, инженера отдела труда. Время машинное в акт вносит разработчик управляющей программы, а время наладки, снятия-установки – нормировщик цеха. Утверждает акт о внедрении Главный технолог. Пример карточки управляющей программы в системе «Лоцман: PLM» изображен на рис. 3.

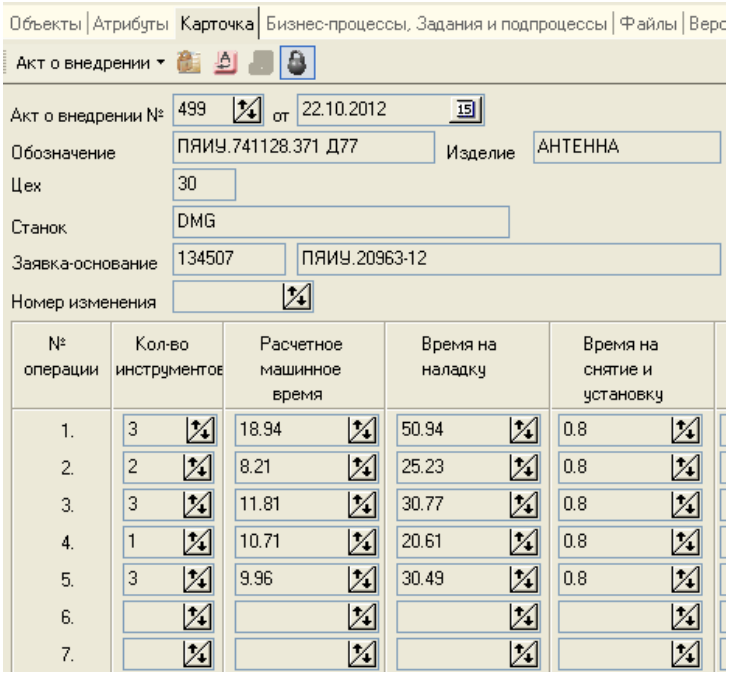


Рис. 3. Карточка управляющей программы

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Блок-схема алгоритма оптимизации расписания представлена на рис. 4. В начале работы пользователь (мастер участка) формирует список ДСЕ, выбирает оборудование, настраивает производственный календарь, при необходимости устанавливает приоритет в очередности раскладки деталей по изделиям, запускает процедуру оптимизации.

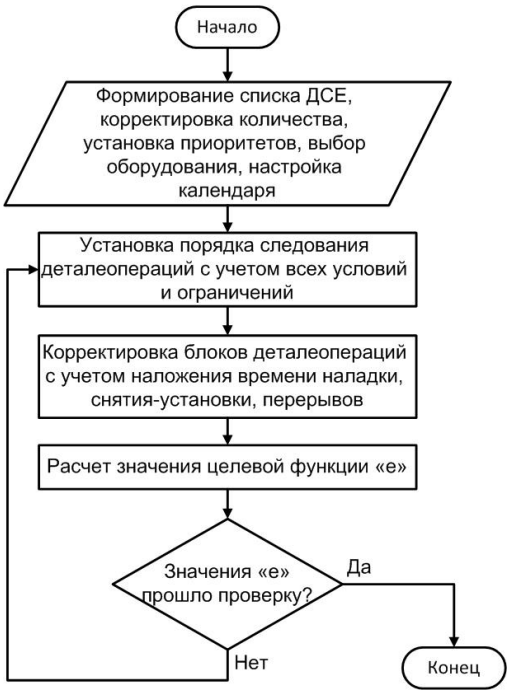


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации

В ходе каждой итерации значения параметров (порядковые номера ДСЕ) рассчитываются в соответствии с методом Налдера-Мида (метод деформируемого многогранника), выполняется корректировка блоков деталеопераций с учетом наложения времени наладки, снятия-установки, а также регламентированных перерывов и пересменок. Цикл прекращается если значение целевой функции е в течении последних пяти итераций не изменялось более чем на 5 процентов.

На рис. 5 изображено главное окно системы автоматизации, разработанной в качестве средства программной поддержки предлагаемой методики.

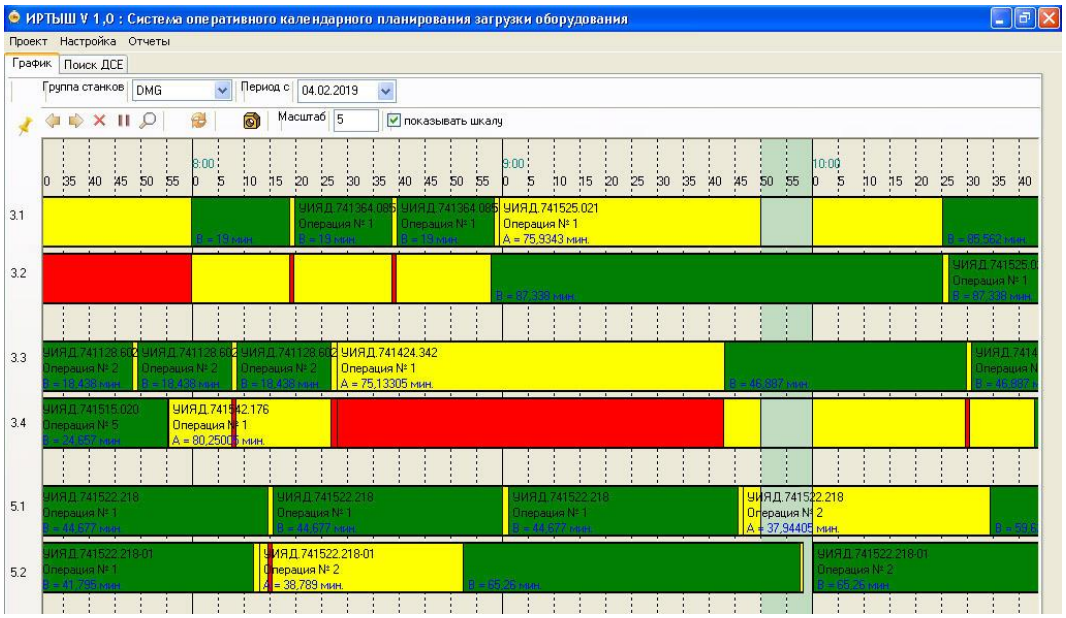


Рис. 5. Главное окно системы

Производственное расписание здесь представляется в виде диаграммы Ганта: каждой деталеоперации соответствует блок, длина которого пропорциональна ее длительности. Эти блоки, располагаются напротив условных номеров станков. Желтый цвет – это время наладки и снятия-установки, т. е., то время, когда задействован наладчик, зеленый – машинное время, светло-зеленый – время перерыва, красное – простой.

В ходе смены могут возникать ситуации незапланированного останова (например, выхода оборудования из строя). Для таких случаев предусмотрена возможность корректировки расписания введением блоков пауз (рис. 6), с последующим запуском процедуры оптимизации. Кроме того, мастер участка может скорректировать расписание, путем перетаскивания блоков деталеопераций как в пределах станка, так и между станками и группами станков.

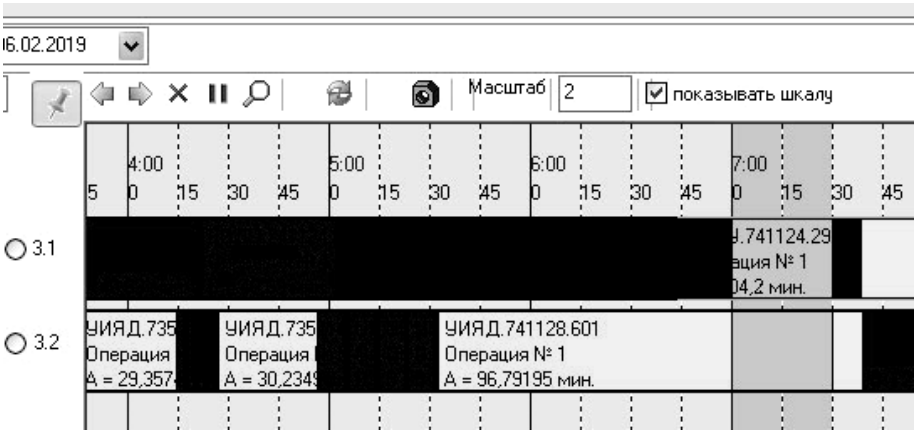


Рис. 6. Фрагмент диаграммы Ганта

Набор данных, который является результатом процедуры оптимизации, позволяет получать различные отчеты. Одним из отчетов является подробное сменно-суточное задание (рис. 7).

Сменно-суточное задание для группы станков 3.1-3.2					
Дата	Время	Станок	ДСЕ	Операция	Событие
06.02.2019	08:11 - 08:13	3,1	ВИДУ.741124.298	1	Снятие, установка
06.02.2019	08:12 - 08:27	3,1	УИЯД.735214.687	1	Наладка
06.02.2019	08:28 - 08:31	3,1	УИЯД.735214.687	1	Возврат к наладке
06.02.2019	08:31 - 08:32	3,2	УИЯД.741128.601	1	Снятие, установка
06.02.2019	08:32 - 08:52	3,1	УИЯД.735214.687	1	Возврат к наладке
06.02.2019	08:56 - 08:58	3,2	УИЯД.741128.601	1	Снятие, установка
06.02.2019	08:57 - 08:58	3,1	УИЯД.735214.687	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:02 - 09:03	3,1	УИЯД.735214.687	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:07 - 09:09	3,1	УИЯД.735214.687	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:12 - 09:14	3,1	УИЯД.735214.687	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:18 - 09:19	3,1	УИЯД.735214.687	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:19 - 09:22	3,1	УИЯД.735214.687	2	Наладка
06.02.2019	09:22 - 09:23	3,2	УИЯД.741128.601	1	Снятие, установка
06.02.2019	09:22 - 09:49	3,1	УИЯД.735214.687	2	Возврат к наладке
06.02.2019	09:59 - 10:01	3,1	УИЯД.735214.687	2	Снятие, установка

Рис. 7. Пример отчета «Сменно-суточное задание»

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты опытной эксплуатация системы, проведенной в АО «ОмПО «Иртыш», показали эффект, выраженный в сокращении времени простоя станков. В качестве основных результатов работы можно выделить:

1. Проведенный анализ потерь рабочего времени, позволил выбрать в качестве критерия эффективности – время простоя станка группы.
2. Разработанный алгоритм, позволяет решать задачу оптимизации плана загрузки группы станков с ЧПУ.
3. Разработанная система автоматизации, позволяет составлять расписания загрузки оборудования с учетом различных производственных условий и ограничений.
4. Внедрение системы дает возможность мастеру участка ЧПУ оперативно реагировать на изменения производственной ситуации, что, в конечном итоге, ведет к сокращению времени простоя станков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султан-заде Н. М., Загидуллин Р. Р. Повышение производительности ГПС путем оптимизации расписаний // СТИН. 1996. № 12. С. 9–13.

УДК 514.75/ 77

ПОСТРОЕНИЕ ОБВОДОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА ГЛАДКОСТИ ИЗ ДУГ КРИВЫХ 2-ГО ПОРЯДКА

Т. М. Мясоедова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **Решение многих инженерных задач требует построения кривых линий, проходящих через упорядоченный массив точек. Практические задачи по формированию сложных технических контуров сопряжено с представлением всего контура, как линии, сконструированной из составных кривых, сформированных из дуг простых кривых. Здесь возникает задача – стыковки этих дуг между собой с заданным порядком гладкости. В работе рассмотрены примеры построения гладкого класса обвода методом кривых второго порядка с заданными касательными в узлах.**

Ключевые слова: кривая второго порядка, кривизна, касательная, алгоритм.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-212-215

I. Введение

В инженерной практике конструируют обводы различной степени гладкости в зависимости от требований, предъявляемых к качеству технических поверхностей. При проектировании технических поверхностей сложной формы автоматизация геометрических расчетов существенно зависит от применяемых алгоритмов моделирования и применяемого математического аппарата. Обеспечение 2-го порядка гладкости и выше, который подразумевает совпадение кривизны в точке стыковки задача решение которой опирается на достаточно сложные алгоритмы, связанные с определением нужного количества производных в месте стыковки. Чем выше порядок гладкости, тем сложнее геометрический алгоритм формирования обвода, а соответственно и его аналитическое описание. Однако задачу построения обвода необходимого порядка гладкости можно значительно упростить, если все необходимые свойства заложить на стадии конструирования дуги обвода [1]. В геометрическом моделировании большое теоретическое и прикладное значение имеет разработка методов и алгоритмов проектирования сложных криволинейных обводов, описываемых параметрической форме.

II. Постановка задачи

Для сложного контура из дуг кривых второго порядка, принимаемого в качестве профиля карманной поверхности технического изделия, требуется построить замкнутую кривую класса C^2, проходящую через узловые точки сложного контура [2]. Применяемые методы должны выполнять следующие требования:

1. Методы должны обеспечивать гладкое соединение отдельных кривых (сегментов),
2. Методы должны обеспечивать возможность управления формой кривой путём изменения небольшого количества параметров,
3. Включение нового сегмента кривой не должно нарушать гладкость всей кривой.

III. Теория

Исходными данными для построения обвода являются точки $M_i\left(x_{Mi}, y_{Mi}\right)$ массива $\left\{M_i\right\}_1^N$, $i=1\ldots N$, касательные l_i проходящие через точки массива (рис 1.) и значение кривизны заданное в начальной точке обвода. Касательные задаются параметрическими уравнениями прямых проходящих через точки G_i и M_{i+1}, G_i – точка пересечения касательных, проходящих через соседние точки контура. l_i задаются следующим образом:

$$l_i:\ \ x_{li} = m_i t_i + x_{Mi};\ y_{li} = n_i t_i + y_{Mi};\ \ t_i \in [0,k], \tag{1}$$

где $\overline{e}_{Mi} = \{m_i, p_i\}_i^N$ направляющие вектора касательных, k – параметр, определяющий положение точек пересечения касательных G_i, $1 < k < 2$.

Для касательной $l_1=G_1M_2$, G_1 – определяется как вершина равностороннего треугольника $\Delta M_1G_1M_2$. Для касательных $l_2\ldots l_N$, $G_2\ldots G_N$ находятся из выражения (1), где $t=k$.

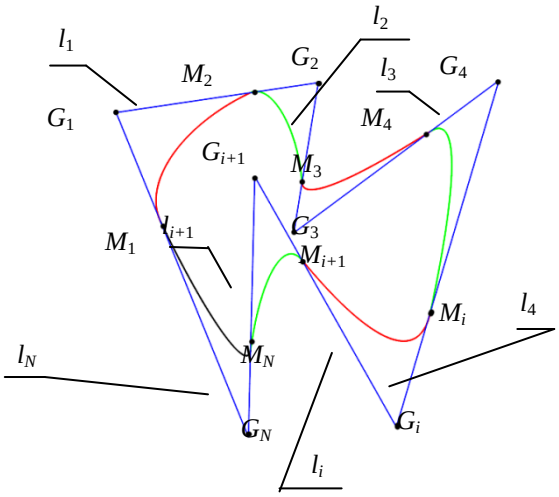


Рис. 1. Исходный контур $\{M_i\}_1^N$, l_i – касательные, G_i – точки пересечение касательных

В основу описания положен алгоритм построения обвода гладкости C^2 кривыми второго порядка с заданными в узлах касательными предложенный в работе [3].

Замкнутые контуры описываются параметрическими уравнениями сегментов $\overline{R_i}$ обводов контуров:

$$\overline{R_i} = \frac{\bar{r}_i + t\bar{r}_{Gi} + t^2\gamma_i\bar{r}_{i+1}}{1+t+\gamma_i t^2}, \quad t = \frac{\tau}{1-\tau}, \quad \tau \in [0,1); \quad \bar{r}_i = \{x_i, y_i\}, \tag{2}$$

где G_i – точка пересечение касательных, γ_i – расчётный параметр. Параметр γ_1 рассчитывается по формуле (2), $k(M_1)$ – кривизна в начальной точке обвода. При этом форма кривой обвода регулируется кривизной $k(M_1)$ в начальной точке обвода первого сегмента и положением G_i точек пересечения касательных.

$$\gamma_1 = \frac{k(M_1)\left|\overline{M_1G_1}\right|^3}{S\Delta M_1G_1M_2}, \tag{3}$$

где $S\Delta M_1G_1M_2$ – площадь треугольника, вершины которого точки M_1, M_2 и G_1. G_1 – точка пересечения касательных, проходящих через точки M_1, M_2.

Для последующих сегментов обвода параметр γ_i рассчитывается по формуле [3]:

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i \frac{S\Delta M_iG_iM_{i+1}}{S\Delta M_iG_{i+1}M_{i+2}} \left(\frac{\left|\overline{M_{i+1}G_{i+1}}\right|}{\left|\overline{M_{i+1}G_i}\right|} \right)^3, \quad i = 1, 2, \ldots, N-1. \tag{4}$$

В результате получены на плоскости (xy) векторные уравнения сегментов обвода для замкнутого контура:

$$r_{Mi}: \ \bar{r}_i = (x_i(t_i), y_i(t_i)), \ t_i \in R.$$

IV. Результаты эксперимента

Рассмотрим алгоритмы практического построения обвода замкнутого контура. Контур задан массивом точек $\{M_i\}_1^4$: {(0, 0), (-30, 30), (0, 60), (30, 30), (0, 0)}. Кривизна в точке M_1 принята $k(M_1)$=0,02. По исходным данным, используя предложенный метод и алгоритм построения касательных (рис. 2), строятся сегменты обвода, состоящие из дуг кривых 2-го порядка. При первой итерации построения касательных устанавливается взаимовлияние положения соседних касательных. Расчет касательной l_4 меняет положение G_1. Последующие итерации построения касательных направлены на изменение формы получаемой кривой. В приведенном примере для определения точек G_1(-40,98076211, -10,98076211), G_2(-19,01923789, 70,98076211), G_3(19,01923789, 49,01923789), G_4(40,98076211, 10,98076211) пересечения касательных l_1, l_2, l_3, l_4 , определены параметры t_1=2,

t_2=2, t_3=2, t_4=2. Форма кривой зависит от положения точек пересечения касательных, а также, от радиуса кривизны, заданной в начальной точке обвода (рис. 4).

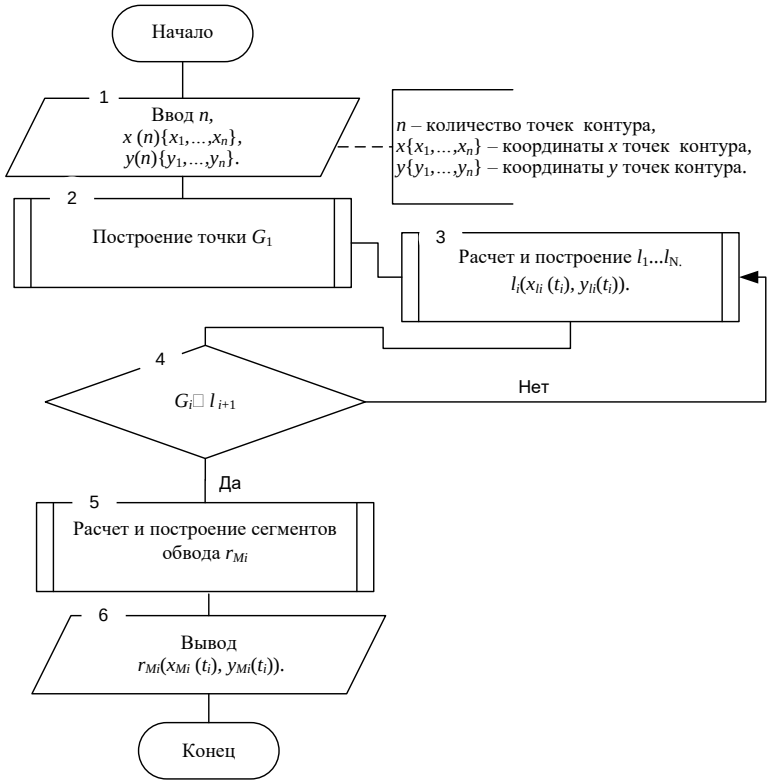


Рис. 2. Обобщенный алгоритм построения сегментов обвода

На рис. 3 представлен результат работы вышеописанного алгоритма. Получены параметрические уравнения дуг сегментов обвода:

$$x_{r_{M1}} = \frac{0,5t\cdot(-81,96152422+52,56764730\cdot t)}{0,4898979490\cdot t^2-t+1},\quad y_{r_{M1}} = \frac{t(-10,98076211+25,67770057\cdot t)}{0,4898979490\cdot t^2-t+1},\ t\in[0,1];$$

$$x_{r_{M2}} = \frac{(1-t)\cdot(-30+10,98076211\cdot t)}{0,8485281370\cdot t^2-t+1},\quad y_{r_{M2}} = \frac{9,930926110\cdot t^2+10,98076211\cdot t+30}{0,8485281370\cdot t^2-t+1},\ t\in[0,1];$$

$$x_{r_{M3}} = \frac{0.2\cdot \mathrm{t}\cdot(95,09618945+379,9163287\cdot \mathrm{t})}{3,166750121\cdot t^2-t+1},\quad y_{r_{M3}} = \frac{105,9832657\cdot t^2-70,98076211\cdot t+60}{3,166750121\cdot t^2-t+1},\ t\in[0,1];$$

$$x_{r_{M4}} = \frac{(1-t)\cdot(30+10,98076211\cdot t)}{0.8485281380\cdot t^2-t+1},\quad y_{r_{M4}} = \frac{(-1+t)\cdot(-30+19,01923789\cdot t)}{0,8485281380\cdot t^2-t+1},\ t\in[0,1].$$

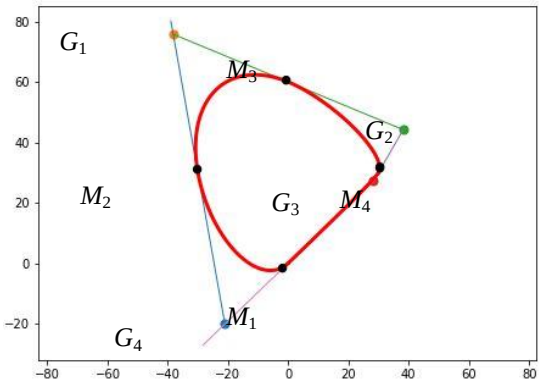


Рис. 3. Обвод кривыми второго порядка

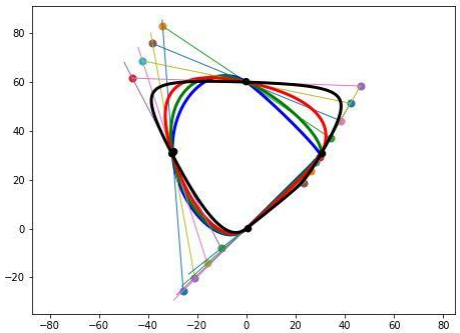


Рис. 4. Изменение формы кривой, в зависимости от положения касательных и кривизны в первой точке обвода

V. Выводы и заключение

Несомненным преимуществом предложенного подхода является то, что рассмотренный алгоритмом построения гладкого класса обвода, методом кривых второго порядка с заданными касательными в узлах, опирается на простые алгоритмы, не связанные с определением нужного количества производных в месте стыковки для обеспечения 2-го порядка гладкости. Но следует отметить, что требуемая форма кривой достигается итерационными методами управления формой кривой, и в случае построения обвода по большему количеству узловых точек степень автоматизации снижается.

Список литературы

1. Иванов Г. И. Начертательная геометрия / Под ред. Г.И. Иванов. М.: Машиностроение, 1995. 224 с.

2. Мясоедова Т. М., Панчук К. Л. Геометрическая модель генерации семейства контурно-параллельных траекторий (эквидистант) обрабатывающего инструмента // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 2. С. 262–269.

3. Фоменко В. Т., Сидорякина В. В. Построение гладкого класса C^2 обвода методом кривых второго порядка с заданными касательными в узлах // Вестник Таганрогского государственного педагогического института. 2013. № 1. С. 37–41.

УДК 621.01

МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕКТОРА ОБОБЩЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ РУКИ АНДРОИДНОГО РОБОТА

Ф. Н. Притыкин, В. И. Небритов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **При планировании движения механизма руки андроидного робота в организованном пространстве существует необходимость сокращения времени расчета траектории в пространстве обобщенных координат. Указанное время значительно зависит от времени расчета вектора приращений обобщенных координат на каждом шаге расчетов. В работе проведены геометрические исследования на основе изучения закономерностей изменения среднего смещения узловых точек, которые задают положение механизма руки андроидного робота при реализации мгновенных состояний. На основе геометрического анализа указанных смещений предложен метод, позволяющий сократить время итерационного поиска вектора приращений обобщенных координат.**

Ключевые слова: линейные смещения; андроидный робот; узловые точки; синтез движений; пространство обобщённых координат; движение по вектору скоростей.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-215-219

I. Введение

Одной из задач при планировании движения механизма руки автономно функционирующего андроидного робота в организованной среде является сокращение времени расчёта траектории в пространстве обобщённых координат [1–4]. Указанное время значительно зависит от времени расчёта вектора приращений обобщённых координат на каждом шаге расчетов [5, 6].

II. Постановка задачи

В настоящей работе приведены исследования, позволяющие сократить указанное время вычислений на примере синтеза движений механизма руки андроидного робота AR-600E по вектору скоростей. Для решения поставленной задачи определим средние смещения узловых точек механизма руки по направлениям осей инерциальной системы координат при его реализации мгновенных состояний для различных конфигураций. Указанные реализации удовлетворяют заданной точности позиционирования центра выходного звена (ВЗ). В работе предложен способ, позволяющий сократить время итерационного поиска значения вектора мгновенных обобщённых скоростей, при котором отсутствует пересечение механизма руки с запретной зоной. Исследование значения параметра, определяющего среднее смещение узловых точек механизма руки, позволили определить конфигурации, для которых достигается увеличение смещения указанных точек за одну итерацию [7, 8].

III. Теория

В работе [8] исследованы максимальные значения параметров задающих форму и положение области Ω допустимых значений вектора обобщённых скоростей механизма руки андроидного робота для различных конфигураций.

Вектор обобщённых скоростей определяется известной зависимостью:

$$Q_N = Q_M + \sum_{i=1}^{p} k_i m Q_l \,, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{Q_M}$ – вектор, задающий точку $M^Q \in \Gamma^Q$ соответствующую критерию минимизации объёма движения. Верхний индекс ^{Q} обозначает принадлежность геометрического объекта пространству обобщённых скоростей Q. Точка M^Q имеет минимальное удаление от начала координат многомерного пространства Q и задает центр репера связанного с p-плоскостью Γ^Q определяемой линейной системой уравнений задающей зависимость обобщённых скоростей от скоростей выходного звена (ВЗ) [7]; k_i – координаты точки N^Q в p-плоскости Γ^Q (каждой точке N^Q соответствует определенное мгновенное состояние механизма манипулятора); m – длина единичного отрезка репера p-плоскости Γ^Q; $\boldsymbol{Q_l}$ – единичные направляющие векторы осей репера; p – размерность p-плоскости Γ^Q. Для механизма руки андроидного робота, размерность пространства обобщённых скоростей равна пяти, а размерность p-плоскости Γ – двум. Синтез движений осуществляется по трех компонентному вектору линейных скоростей ВЗ. Ориентация ВЗ может быть какой угодно.

Для определения среднего значения смещений узловых точек O_i для указанной области Ω необходимо вычислить значение параметра Q^{xyz}, который характеризует способность изменять положения указанных точек O_i механизма руки робота вдоль осей неподвижной системы координат O_0 [7]:

$$Q^{xyz} = \left(\sum_{j=1}^{3} \sum_{i=1}^{mn} \left(x_{ji}^{max} - x_{ji}^{min} \right) \right) / mu \,, \tag{2}$$

где x_{ji}^{max}, x_{ji}^{min} – максимальные и минимальные значения координат узловых точек O_{mu} механизма руки в системе O_0 (см. рис. 1) при реализации значений векторов обобщенных скоростей (1) из области Ω; j – задаёт номер координаты в системе O_0 ($1 \le j \le 3$); i – номер узловой точки механизма манипулятора ($1 \le i \le mu$); mu – задает число узловых точек механизма манипулятора на основе задания модели кинематической цепи [6].

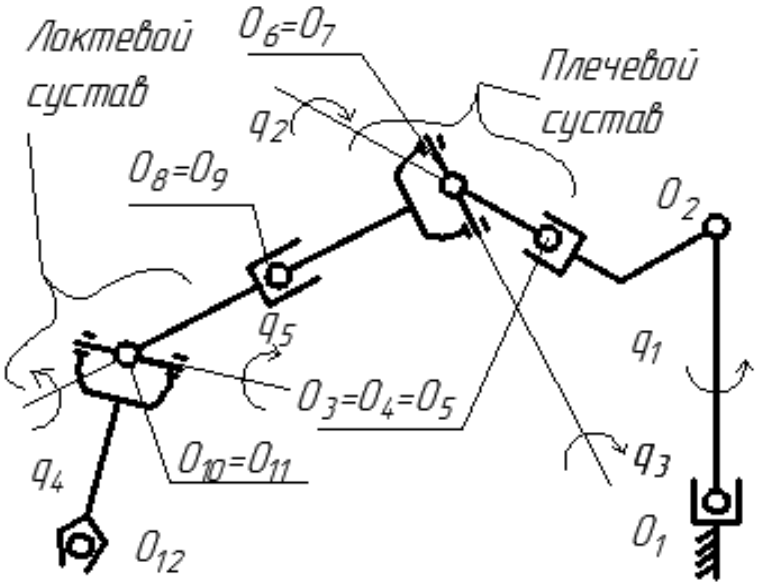


Рис. 1. Кинематическая схема механизма руки андроидного робота AR-600E

Учитывая совпадения начал систем координат связанных со звеньями механизма андроидного робота (см. рис. 1) $O_3 = O_4 = O_5$, $O_6 = O_7$, $O_8 = O_9$, $O_{10} = O_{11}$, количество исследуемых узловых точек равно $mu = 5$.

Параметр μ, задающий среднее смещение (приходящееся на одну конфигурацию или одну точку области Ω [8]) определяется по формуле:

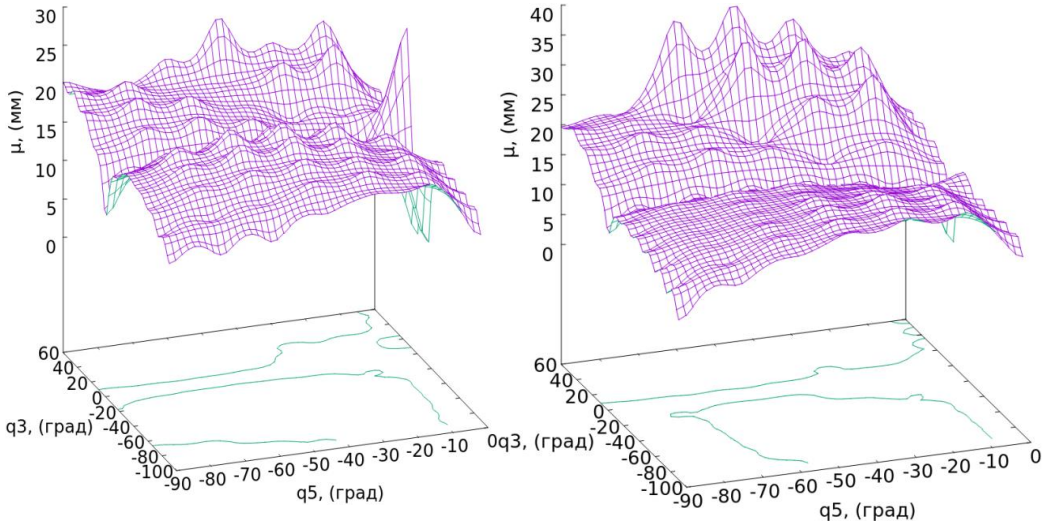
$$\mu = Q^{xyz} / K_{\delta}, \tag{3}$$

где K_{δ} – задаёт множество точек (конфигураций), удовлетворяющих точности позиционирования δ центра ВЗ и принадлежащих области Ω [8].

Для изучения закономерностей изменения параметра μ для множества конфигураций вначале задают совокупность значений векторов обобщённых координат q_i(0°, -20°, q_3, -20°, q_5), где компоненты вектора q_3 и q_5 изменяются с шагом в 10° в пределах -90° ≤ q_3 ≤ 70° и -90° ≤ q_5 ≤ 0° соответственно. Значения компонент вектора линейных скоростей центра ВЗ приняты $\boldsymbol{V}$ (10 мм/с, 0, 0).

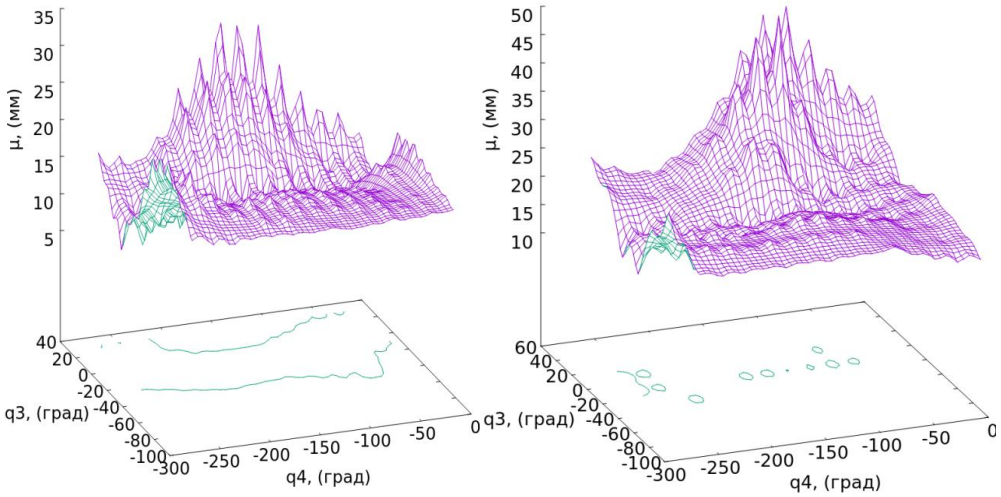
Анализ значений параметра μ для различных конфигураций выполним путем построения поверхностей, отражающих функции $\mu = f_1$ (q_3, q_5), $\mu = f_2$ (q_3, q_5) при q_2 = -20°, -40° и q_4 = -20°, -40°.

На рисунке 2 представлены зависимости $\mu = f_1$ (q_3, q_5) при $q_2 = q_4$ = const, а рис. 3 зависимости $\mu = f_1$ (q_3, q_4), при $q_2 = q_5$ = const. На указанных рисунках на горизонтальной проекции изображены линии уровня соответствующие значению параметра μ = 5.



а б

Рис. 2. Графики зависимостей: а) $q_2 = q_4$ = -20°, $\mu = f_1$ (q_3, q_5);
б) $q_2 = q_4$ = -40°, $\mu = f_2$ (q_3, q_5)



а б

Рис. 3. Графики зависимостей: а) $q_2 = q_5$ = -20°, $\mu = f_1$ (q_3, q_4);
б) $q_2 = q_5$ = -40°, $\mu = f_2$ (q_3, q_4)

IV. Результаты экспериментов

На рис. 4 представлены изображения положений некоторых звеньев руки робота при реализации вектора $\boldsymbol{Q}_N$ для максимального и минимального значений параметра μ_{max} = 41,1 и μ_{min} = 5,9. Точки O_1^{12}, O_2^{12}, O_1^5 и O_2^5, на рисунке соответственно определяют горизонтальные и фронтальные проекции точек O^{12} и O^5 (см. рис. 1).

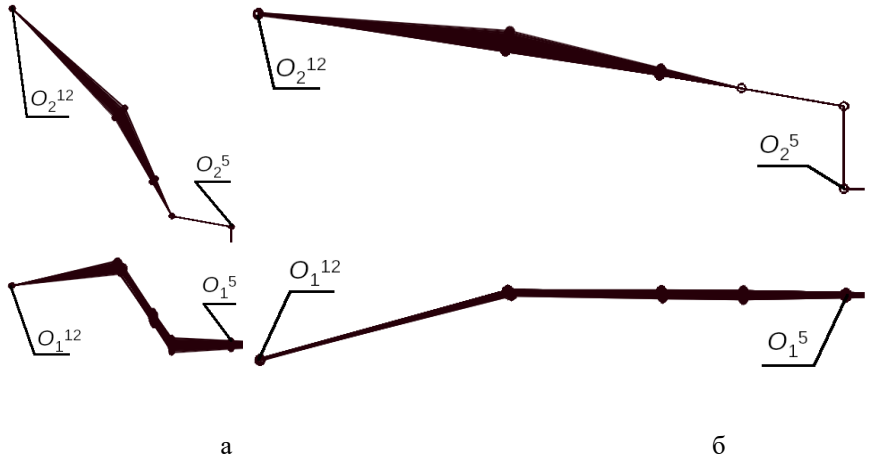


Рис. 4. Реализация вектора $\boldsymbol{Q}$ для конфигураций, заданных вектором $\boldsymbol{q}_i$:
а) для q_i(0°, -60°, 60°, -60°, -60°), μ_{max} = 41,1, K_δ = 43, Q^{xyz} = 1768,5;
б) для q_i(0°, -60°, 0°, -60°, -15°), μ_{min} = 5,9, K_δ = 274, Q^{xyz} = 1605,7

V. Обсуждение результатов

Как видно из расчётов и графиков функций рис. 3–4 для областей Ω, соответствующих различным конфигурациям, значения параметра μ имеют существенные различия. Это означает, что для конфигурации, где значения μ минимальны (например, $\mu < 5$) при изменении значений k_i зависимости (1) на единицу, смещение конфигурации, полученной реализацией мгновенного состояния от исходно заданной будет незначительным. Также будет незначительно и смещение конфигурации по отношению к запретным зонам. Для данных конфигураций существует необходимость увеличения значения параметра m в зависимости (1), который задаёт длину единичного отрезка репера. Результаты расчётов тестового задания, связанного с моделированием движения механизма руки андроидного робота при наличии запретной зоны (см. рис. 5) с анализом и изменением значений параметров μ и m (1) показали сокращения времени расчёта на ≈20%.

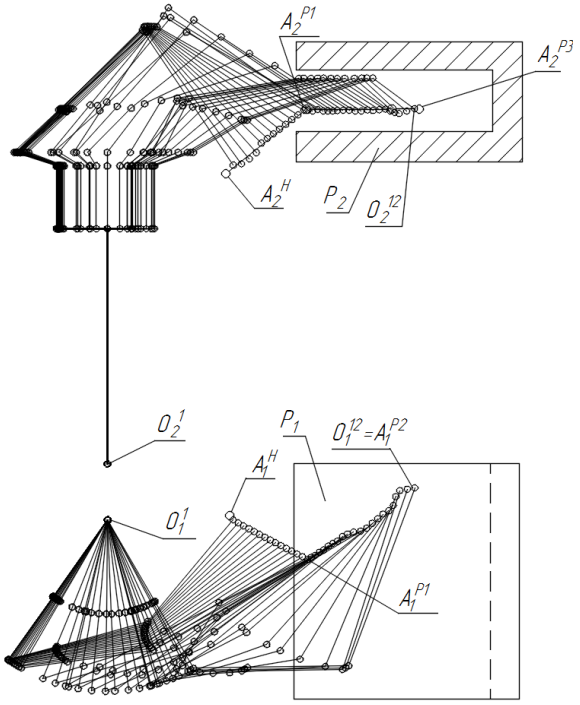


Рис. 5. Результаты моделирования движения центра ВЗ руки андроидного робота

VI. Выводы и заключение

Проведённые исследования могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем управления движением автономно функционирующих андроидных роботов в организованной среде без участия человека-оператора.

Список литературы

1. Gulletta G., Araújo S. M., Costa e Silva E., Costa M. F., Erlhagen W., Bicho E. Nonlinear Optimization for Human-like Synchronous Movements of a Dual Arm-hand Robotic System // International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, 2014.

2. Hasegawa T., Suehiro T., Takase K. A model-based manipulation system with skill-based execution // IEEE Trans. Rob. and Autom., 1992. No. 5. P. 535–544.

3. Karpushkin V. N., Chernavsky A. V. The reduction of the control of movement for manipulation robots from many degrees of freedom to one degree of freedom // Journal of Mathematical Sciences. 1997. P. 531–533.

4. Ko N. Y., Lee B. N., Ko M. S. An approach to robot motion planning for time-varying obstacle avoidanse using the view-time concept // Robotica. 1993. No. 4. P. 315–327.

5. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. М. : Наука. 1985. 343 с.

6. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.

7. Притыкин Ф. Н., Захаров В. А. Исследование манёвренности механизма манипулятора при заданной точности позиционирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 3 (109). С. 67–71.

8. Притыкин Ф. Н., Небритов В. И. Исследование размеров и формы области в многомерном пространстве обобщённых скоростей, задающей допустимые мгновенные состояния механизма андроидного робота // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 29–34.

УДК 658.5.012.1

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МИКРОСКОПА UHL VMM 150

С. В. Такаюк, А. В. Тигнибидин, Е. Б. Чарушина
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье рассмотрен частный случай оценки точности цифрового инструментального микроскопа в условиях метрологической лаборатории в Центре подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для ПО «Полет». Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называют прибор, в котором измеряемая величина преобразуется в цифровой код и в соответствии с кодом представляется на отсчетное устройство в цифровой форме. Для микроскопа Uhl VMM 150 была проведена оценка погрешности, основанная на проведении многократных измерений.**

Ключевые слова: точность, метрология, измерение.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-219-223

I. Введение

Измерительные микроскопы это самые распространенными оптико-механическими приборами на производстве. Их широко применяют в измерительных лабораториях машиностроительных заводов н научно-исследовательских институтов. На них можно проводить измерения линейных и угловых размеров в прямоугольной и полярной системах координат. Инструментальный микроскоп – это профессиональный оптический прибор, который предназначен не только для наблюдений, но и для измерений. Раньше невозможно было приобрести точный измерительный микроскоп с видеозахватом российского производства, но с 2010 года началось производство точных приборов в России. Например, инструментальный микроскоп ИМЦЛ, изготавливаемый Новосибирским приборостроительным заводом, используется на машиностроительных предприятиях для оценки линейных и угловых размеров деталей, валов, фрез, резцов и других элементов сложной техники. Данные микроскопы имеют большие возможностях и много особенностей, так как они создаются по точным техническим условиям (АЛ2.787.140 ТУ) и даже внесены в Государственный реестр средств измерения – это действи-

тельно сложные оптико-механические приборы. Все профессиональные инструментальные микроскопы, снабженные отсчетными устройствами для проведения измерений, относятся к классу высокоточной техники.

В последнее время больше выпускают инструментальные оптические микроскопы и профильные проекторы с электронным отсчетным устройством. Так, например, микроскопы марки ETALON моделей TCM50, TCM100 или TCM200 предназначены для бесконтактных измерений линейных размеров и углов, а также для контроля контуров заготовок деталей, обработанных на металлорежущих станках и другом оборудовании. Гнутые и литые детали, штампованные детали, всевозможные пружины, детали двигателей и коробок передач, режущий инструмент, калибровочные пробки, копиры, лекала, электроды электроэрозионных станков, а также детали зубчатых передач и резьбовых соединений могут измеряться на этих микроскопах.

Микроскопы и профильные проекторы используются для контроля образцов и партий изделий на операциях механообработки и литья, а также для входного контроля. Они также предназначены для профессионального обучения персонала, а также для использования в НИИ и КБ, в ПТУ и технических вузах и в испытательных, поверочных и криминалистических лабораториях.

II. Постановка задачи

В лаборатории «методы и средства измерения и контроля» в Центре подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для ПО «Полет» установлен инструментальный микроскоп Walter Uhl technische Mikroskopie GmbH & Co. KG VMM 150, который подходит для таких отраслей как машиностроение, металлообработка, автомобилестроение, авиационная и космическая промышленность, электроэнергетика, прецизионные механизмы и оптико-механическая промышленность. Технические характеристики представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ХАРАКТРИСТИКИ МИКРОСКОПА

Характеристика	Значение
Точность измерительного стола	≤ 2.6 мкм на 150 мм измеряемой длины
Управляемый X/Y стол на специализированных роликах с измерительным диапазоном	150 x 100 мм
Дискретность	0.0001 мм
Опциональная цифровая измерительная система оси Z	150 мм
Абсолютная погрешность	1.8 мкм + 0.005 x L мкм (где L в мм)
Измерительный диапазон	150 x 100 мм

Для проведения оценки точности микроскопа VMM 150 объект-микрометр ОМ-ДТ7.216.009ПС. Было проведено 500 последовательных измерений для оценки точности микроскопа. Технические характеристики объект-микрометра представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
ХАРАКТРИСТИКИ МИКРОСКОПА

Характеристика	Значение
Длина основной шкалы	1± 0.0005 мм
Длина основного деления каждого из интервалов с измерительным диапазоном	0.005±0,0003 мм
Длина 20 делений каждого из интервалов	0.1 ±0,0003 мм
Ширина штрихов школы	0.002 ±0,0005 мм
Габаритные размеры	80 x 30 x 3 мм
Масса	0.035 кг

III. Теория

Объект-микрометр предназначен для проведения калибровки системы анализа изображений том случае, если измерения необходимо проводить в реальных единицах. Объект-микрометр представляет собой пластину, в центре которой находится измерительная шкала длиной 1 мм с ценой деления 0,01 мм. Объект-микрометры изготавливаются для микроскопов отраженного и проходящего света. Соответственно они называются объект-микрометр ОМО и объект-микрометр ОМП. Сняв изображение микрометра, при каждом рабочем увеличении микроскопа и рабочем разрешении используемой цифровой камеры и указав известное расстояние в специальной методике Калибровка, Вы можете задать количество точек изображения, которые приходятся на единицу измерения.

На рис. 1 представлена схема инструментального микроскопа. На основании 1 с помощью микрометрических головок 3 перемещается в двух направлениях координатный стол 2, обеспечивая заданные стандартом пределы измерения в продольном и поперечном направлениях. Наклон головки 9 вокруг горизонтальной оси 10 осуществляется маховиком 11 наклона колонки. По колонке 9 с помощью механизма фокусировки 8 перемещается кронштейн, на котором закреплен тубус 5 визирного микроскопа с объективом 4. Сверху к тубусу крепится окуляр 7 визирного микроскопа и отсчетный микроскоп угломерной головки 6.

Питание инструментального микроскопа электрическим током осуществляется через понижающий трансформатор.

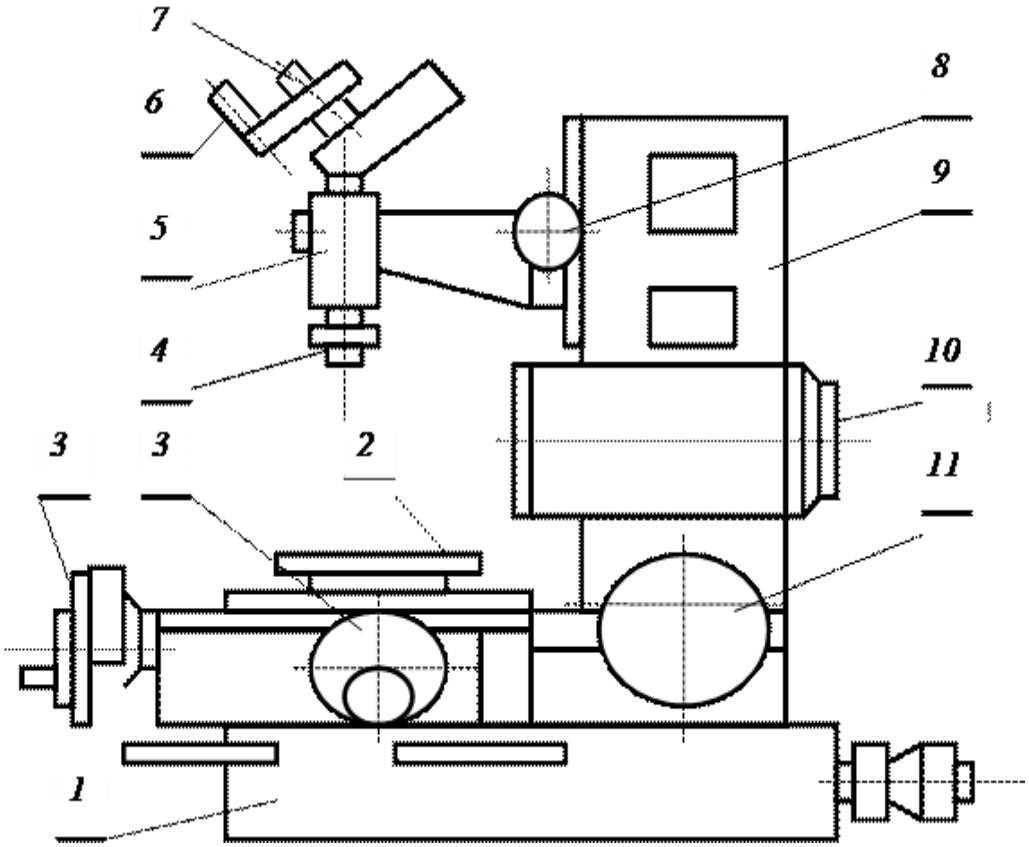


Рис. 1. Схема инструментального микроскопа

IV. Результаты экспериментов

В ходе эксперимента было проведено 50 измерений длины основной шкалы объект – микрометра. Для проведения измерения пользовались следующим алгоритмом:

1. Включить микроскоп
2. Запустить программу «М3»
3. Установить на стекло рабочего стола микроскопа контролируемый объект. Для пленок и бумаги проконтролировать отсутствие неровности поверхности, при необходимости использовать пресс.
4. По оси Z:настроить фокусировку, поворачивая ручку оси Z до четкого фокуса картинки, необходимой для работы.
5. По оси X и Y: снять ограничители перемещения, при помощи ручек довести до необходимой контролируемой зоны.
6. Выбрать режим работы «Перекрестье».
7. Выбрать режим «Точка», «Неограниченный повтор».
8. Перемещая «Перекрестье» создать облако точек, необходимых для определения геометрического размера.

Результаты занесены в табл. 3. Изображение объект - микрометра в микроскопе измерения показано на рис. 2. Процесс измерения показан на рис. 3.

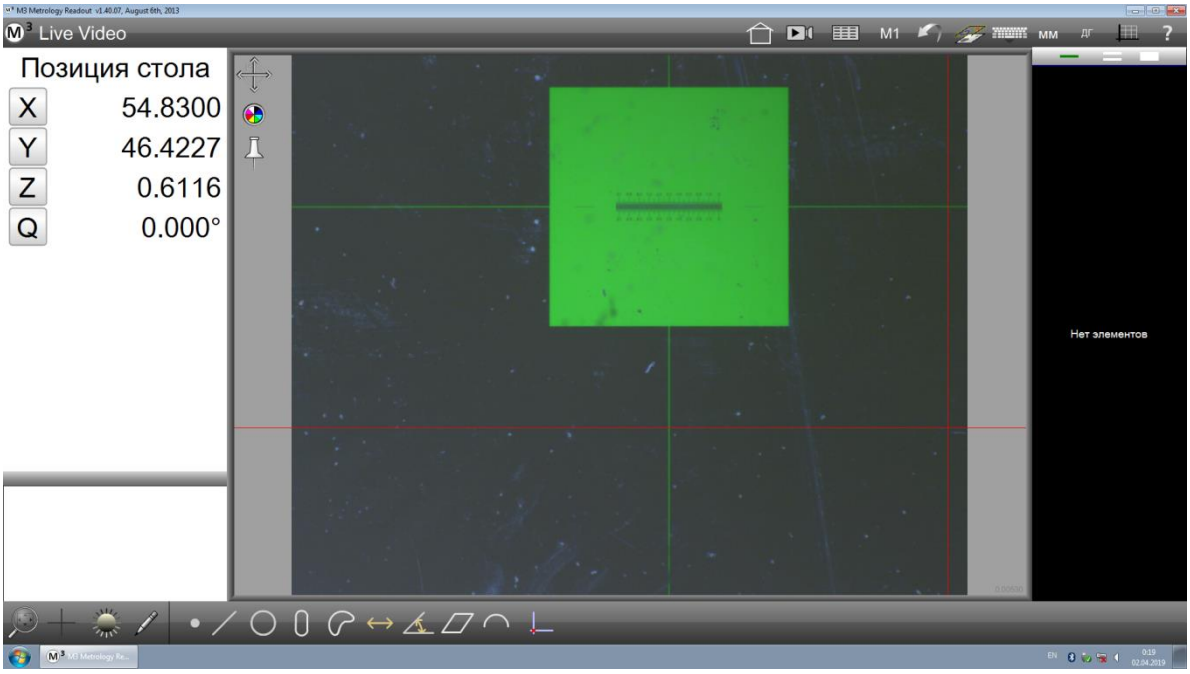


Рис. 2. Изображение объект-микрометра

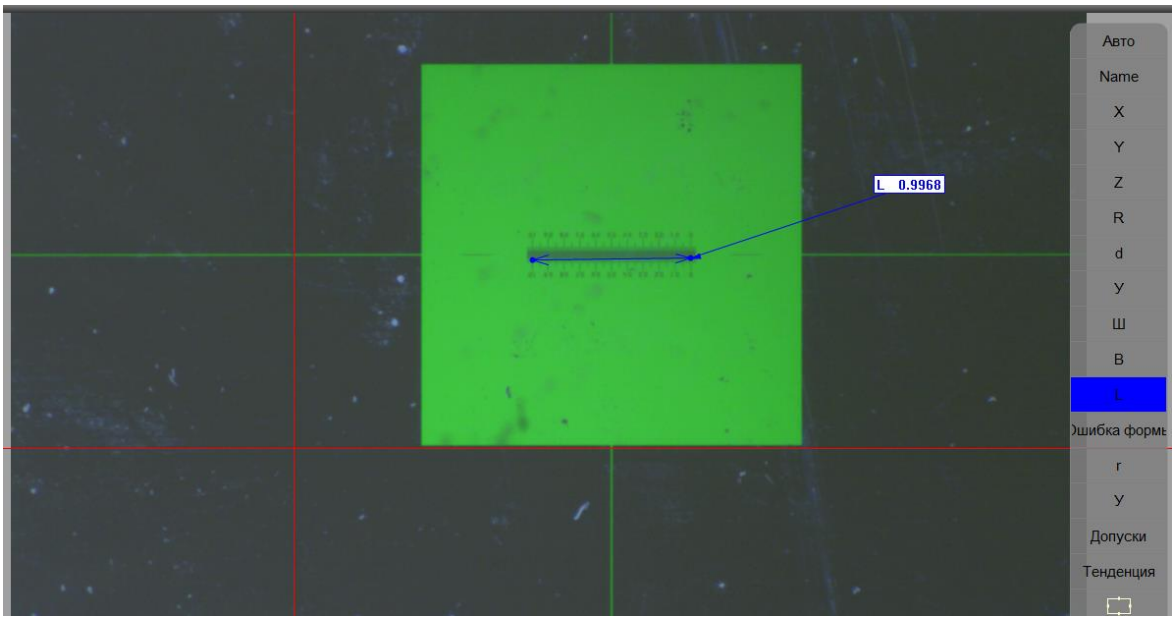


Рис. 3. Процесс измерения объект-микрометра

ТАБЛИЦА 3
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

0,9968	0,9971	0,9972	0,9985	0,9967	0,9960	0,9971	0,9964	0,9975	0,9968
0,9970	0,9976	0,9970	0,9982	0,9976	0,9987	0,9976	0,9987	0,9976	0,9987
0,9968	0,9973	0,9968	0,9973	0,9973	0,9968	0,9973	0,9968	0,9973	0,9968
0,9986	0,9978	0,9975	0,9972	0,9986	0,9986	0,9986	0,9993	0,9976	0,9986
0,9975	0,9914	0,9975	0,9989	0,9914	0,9975	0,9978	0,9975	0,9978	0,9981

V. Обсуждение результатов

После анализа полученных значений сравниваем их с общей погрешностью микроскопа и объект микрометра, который составляет 0,00076 мм. Результаты занесены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ

0,0032	0,0029	0,0028	0,0015	0,0033	0,0040	0,0029	0,0036	0,0025	0,0032
0,0030	0,0024	0,0030	0,0018	0,0024	0,0013	0,0024	0,0013	0,0024	0,0013
0,0032	0,0027	0,0032	0,0027	0,0027	0,0032	0,0027	0,0032	0,0027	0,0032
0,0014	0,0022	0,0025	0,0028	0,0014	0,0014	0,0014	0,0007	0,0024	0,0014
0,0025	0,0086	0,0025	0,0011	0,0086	0,0025	0,0022	0,0025	0,0022	0,0019

Согласно этим результатам перед проведением измерений микроскоп VMM необходимо откалибровать.

VI. Выводы и заключение

При проведении же эксперимента с измерением объект - микрометра было установлено, что при условиях в лаборатории «Методы и средства измерения и контроля» перед проведением измерительного процесса на микроскоп Walter Uhl technische Mikroskopie GmbH & Co. KG VMM 150 необходимо проводить процесс калибровки.

Источник финансирования. Благодарности

Коллектив проекта благодарит за содействие в развитии проекта ректорат Омского государственного технического университета.

Список литературы

1. Бакут П. А., Жулина Ю. В., Иванчук Н. А. Обнаружение движущихся объектов / Под ред. П.А. Бакута. М.: Сов. радио, 1980. 288 с.
2. Khludnev A. M., Kovtunenko V. A. Analysis of cracks in solids. Southampton. Boston: WIT Press, 2000. 120 p.
3. Реутов С., Сафронов Е. Комплектные поставки орудий труда как средство создания системы машин // Вопр. экономики, 1985. № 1. С. 57–67.
4. Khludnev A. M., Kovtunenko V. A. Analysis of cracks in solids. Southampton // Eur. J. 2017. Vol. 2. P. 1–3.

УДК 004.932.4

АЛГОРИТМ ПОВОРОТА ИЗОБРАЖЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГИСТРАЦИОННОГО ЗНАКА АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЕГО РАСПОЗНАВАНИЯ

А. А. Томилов, Л. А. Денисова
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье рассмотрен алгоритм поворота изображения государственного регистрационного знака автомобиля, позволяющий устранить искажения и решить задачу распознавания его символов с помощью сверточных нейронных сетей. Предложенный алгоритм производит первичную обработку исходных изображений с целью формирования на их основе обучающего и тестового наборов данных (откорректированных изображений и соответствующих значений углов поворота). Данный алгоритм характеризуется простотой дополнения массива исходных изображений новыми элементами, благодаря чему возможно варьирование качества и количества исходных изображений и повышение точности результата распознавания.**

Ключевые слова: изображение, угол поворота, распознавание, государственный регистрационный знак автомобиля.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-223-228

I. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения безопасности дорожного движения и борьбы с нарушителями установленных правил используются камеры видеонаблюдения, позволяющие получить изображение автомобиля и его государственного регистрационного знака (ГРЗ) в момент нарушения (например, при превышении допустимой скорости). Для

идентификации лица, совершившего нарушение правила дорожного движения, используют распознавание символов ГРЗ [1, 2]. Однако в условиях многочисленных дестабилизирующих факторов, например, наличия загрязнений на области ГРЗ или его искажения посредством поворота на определенное количество градусов, эффективность распознавания символов ГРЗ падает, что может привести к ошибочному назначению штрафа лицу, не совершавшему нарушение установленных правил дорожного движения.

Для проведения процесса корректирования угла поворота области ГРЗ (приведения текущего значения угла поворота области ГРЗ к нулевому значению), необходимо определить угол поворота ГРЗ автомобиля. В качестве одного из методов определения угла используется преобразование Хафа [3], реализующее алгоритм, с помощью которого производится выделение на изображении прямых линий. Тем не менее, если ГРЗ автомобиля повернут на 180° и при этом вычисленная площадь ГРЗ не превышает площади полученного изображения, то существует вероятность ошибки. В этом случае найденный угол полученной линии (являющейся одной из сторон области ГРЗ) относительно горизонтальной оси будет равен 0°, и процесс корректирования угла не повлияет на успешное распознавание символов ГРЗ. В такой ситуации, в качестве метода определения угла поворота области ГРЗ представляется перспективным применение сверточных нейронных сетей [4, 5], позволяющих решить задачу определения угла поворота методом классификации. В работе рассмотрен алгоритм поворота изображения ГРЗ автомобиля, позволяющий произвести первичную обработку изображений, на основе которых формируется обучающая и тестовая выборки для обучения сверточной нейронной сети, в целях устранения искажений и решения задачи распознавания символов ГРЗ.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для повышения эффективности распознавания символов ГРЗ необходимо минимизировать искажения символов на полученном изображении ГРЗ. Одним из типов искажений символов является поворот ГРЗ автомобиля на произвольный угол. В целях устранения подобной деформации символов ГРЗ необходимо определить исходный угол поворота ГРЗ. Таким образом, целью работы является определение угла поворота области ГРЗ транспортного средства на изображении, полученном в результате использования камер видеонаблюдения, с помощью сверточных нейронных сетей и использования метода классификации. В качестве данных для обучения используются изображения ГРЗ двух типов: сгенерированные с помощью программного обеспечения для имитации существующих ГРЗ [6] и изображения, полученные одним из авторов в результате фотосъемки.

В работе использованы сгенерированные изображения для обучения, которые были получены с помощью портала Supervisely [7] (данные изображения находятся в открытом доступе). Имеющиеся изображения ГРЗ, которые представлены в виде фотографий, имеют разную степень зашумленности, так как не подвергались предварительной обработке. На рис. 1 представлены образцы имеющихся изображений ГРЗ, используемых для обучения сверточной нейронной сети.

а б

Рис. 1. Образцы изображений ГРЗ: а – сгенерированное средствами Supervisely, б – полученное при фотосъемке

Определение угла поворота изображения ГРЗ решается методом классификации [8], при этом считаем, что каждое значение угла α (с точностью до 1°) является отдельным классом изображения. Для сопоставления изображения ГРЗ с углом поворота создаются каталоги, имена которых соответствуют значениям угла поворота. При этом в каталогах содержатся изображения ГРЗ, повернутые на количество градусов, совпадающее с именем каталога. Например, каталог с именем «20» содержит изображения, угол поворота которых относительно горизонтальной оси составляет 20°.

III. ТЕОРИЯ

В качестве одного из методов эффективного решения задачи распознавания образов часто используют специальную архитектуру искусственных нейронных сетей – сверточную нейронную сеть [9]. В целях ее обучения необходимо сформировать обучающую выборку, элементы которой в нашем случае представлены парой данных: изображение области ГРЗ и соответствующий ему угол поворота. Процесс формирования обучающей выборки состоит из нескольких этапов. На *первом этапе* каждое исходное изображение ГРЗ, которое будет

присутствовать в обучающей выборке, поворачивается в пределах угла α ∈ [1°…360°] с шагом изменения угла Δα = 1°, и сохраняется в соответствующий каталог. На *втором этапе* создается массив, элементы которого представлены кортежами, состоящими из двух элементов: самого изображения и номера класса, которому данное изображение принадлежит. После этого изображения помещаются в массив *X*, а соответствующие им классы – в массив *Y*.

Рассмотрим подробнее первый этап (наиболее важный) процесса формирования обучающей выборки. Схема алгоритма, выполняющего поворот исходного изображения ГРЗ, представлена на рис. 2–3.

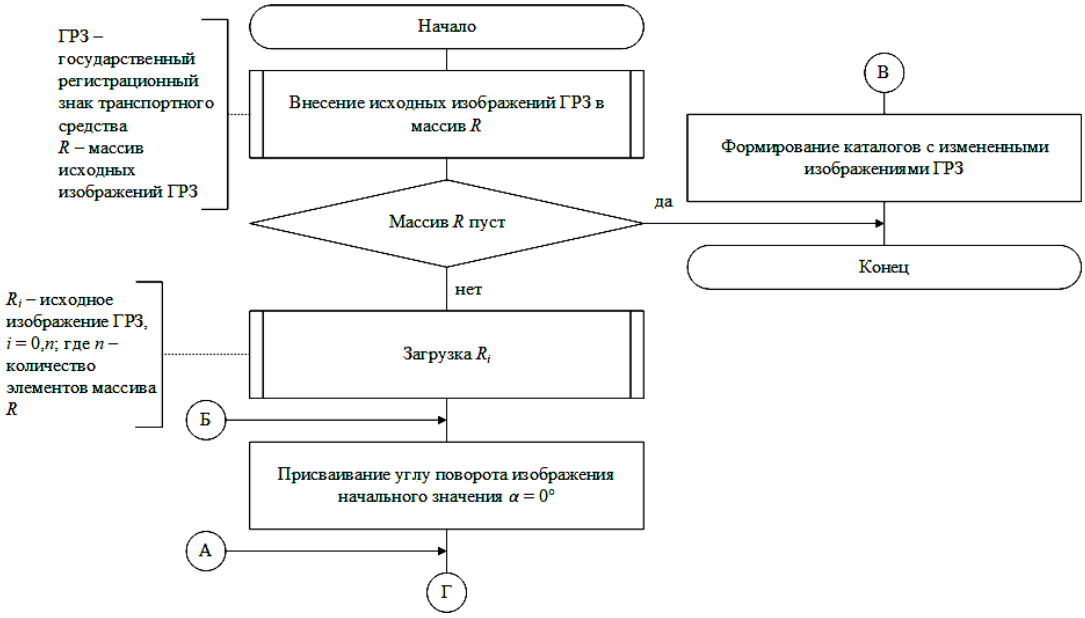


Рис. 2. Схема алгоритма поворота изображения ГРЗ

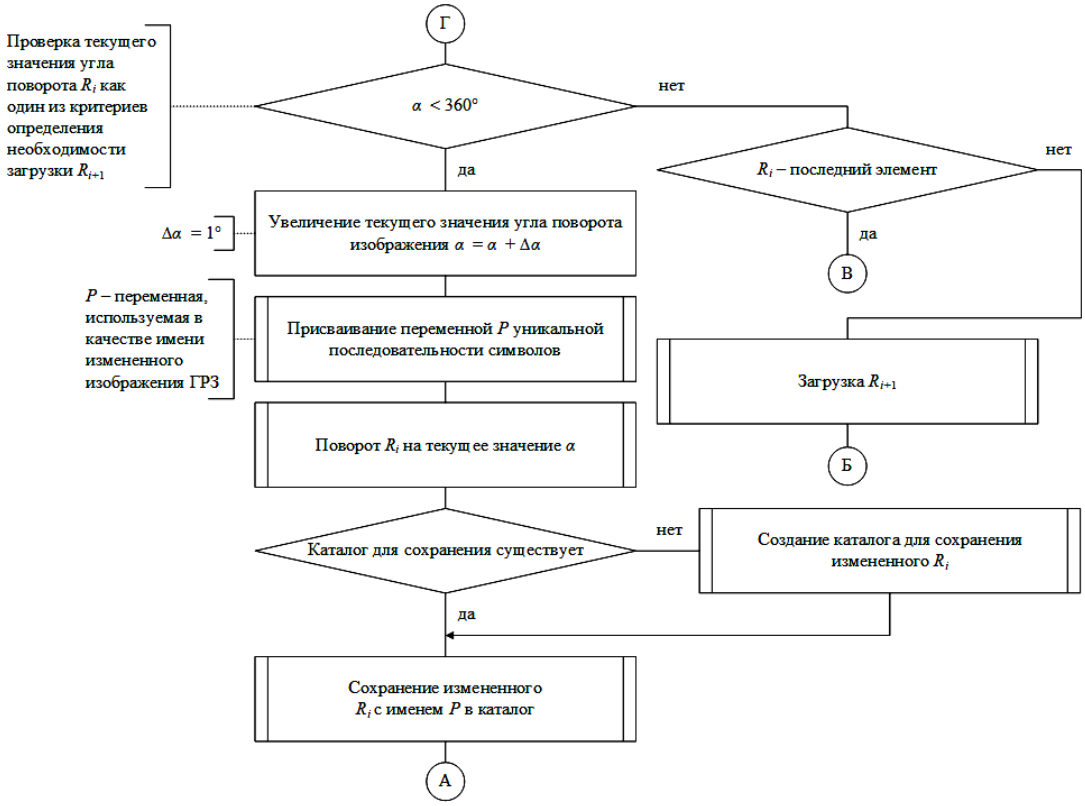


Рис. 3. Схема алгоритма поворота изображений ГРЗ (продолжение)

Входной информацией для обработки являются данные об исходных изображениях ГРЗ, которые вносятся в массив исходных изображений *R*. Если массив *R* пуст, то ожидается его заполнение исходными изображениями ГРЗ. В случае если массив *R* содержит в себе элементы, представленные исходными изображениями ГРЗ, происходит загрузка изображения из данного массива для обработки. Осуществляется поворот изображения на определенное число градусов. При каждом изменении угла поворота создается уникальная последовательность символов, которая используется в качестве имени измененного изображения, чтобы избежать замены предыдущего сохраненного измененного изображения текущим. Если каталога для сохранения повернутого изображения на данный момент не существует, то он создается с соответствующим именем, равным текущему значению угла α, после чего производится сохранение откорректированного изображения ГРЗ.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов использованы исходные массивы, состоящие из сгенерированных изображений и изображений ГРЗ, полученных при фотосъемке. Общее количество измененных сгенерированных изображений, участвующих в обучении нейронной сети, составило 49320 (360 каталогов, в каждом из которых содержатся 137 изображений).

Производилась оценка временных затрат на выполнение первого этапа подготовки обучающей выборки для рассматриваемых двух типов исходных массивов. Получено, что при имеющихся 137 сгенерированных исходных изображениях ГРЗ (каждое из которых имеет одинаковое значение высоты и ширины в пикселях) временные затраты реализации первого этапа составили приблизительно 32 секунды.

В случае использования 137 исходных изображений ГРЗ, являющихся результатом фотосъемки (имеющих разное значение ширины и высоты в пикселях) временные затраты на выполнение первого этапа подготовки обучающей выборки составили приблизительно 4.7 минуты. Из этого следует, что алгоритм чувствителен к изменениям ширины и высоты исходных изображений.

В результате выполнения алгоритма формируется иерархия каталогов и изображений, представленная на рис. 4.

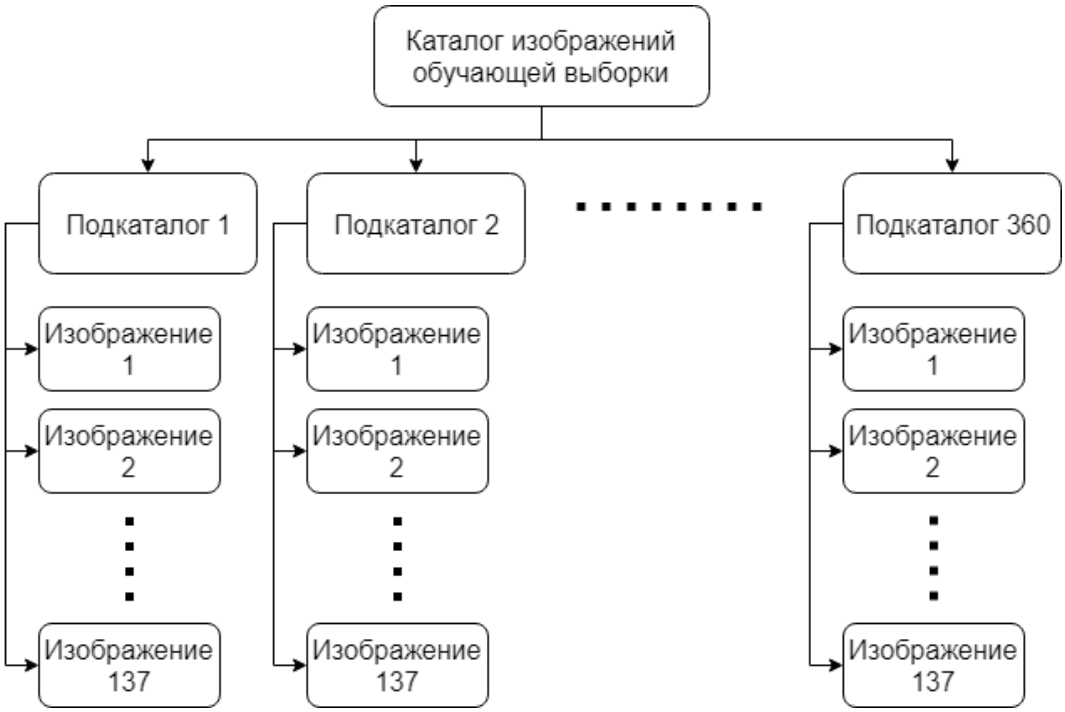


Рис. 4. Иерархия каталогов и обработанных изображений

Как видно, созданный каталог изображений обучающей выборки включает в себя 360 подкаталогов, в каждом из которых содержатся 137 изображений, имеющих различную степень зашумленности. Такое количество необходимо для повышения точности определения угла поворота ГРЗ на изображениях, которые не включались в обучающую и тестовую выборки.

Для иллюстрации результата обработки данных на рис. 5 представлен фрагмент итогового вида изображений в одном из подкаталогов изображений обучающей выборки.

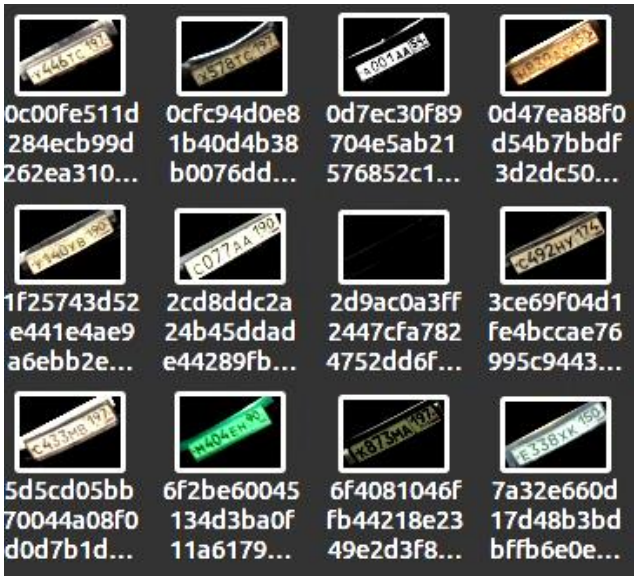


Рис. 5. Фрагмент изображений ГРЗ в одном из каталогов угла поворота

Как видно на рис. 5, изображения в каталоге имеют одинаковый угол поворота и в качестве имени содержат уникальную последовательность символов. Таким образом, изображения в каталоге представляют собой совокупность элементов, обладающих определенным признаком (соответствующим углу поворота), что позволяет использовать данные изображения в качестве образцов одного из 360 классов для подготовки обучающей и тестовой выборок сверточной нейронной сети.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный алгоритм поворота изображений ГРЗ позволяет с малыми временными затратами (приблизительно за 4.7 минуты) подготовить большое количество (49320) изображений с различной степенью зашумленности для последующего использования в качестве обучающей выборки для сверточной нейронной сети. Однако, следует отметить, что наблюдался рост временных затрат при выполнении первого этапа подготовки обучающей выборки более чем в восемь раз в случае изменения типа обрабатываемых изображений на полученные в результате фотосъемки (вместо сгенерированных изображений). Это объясняется неоднородностью фотографических данных в сравнении с данными сгенерированных изображений.

Неоднородность фотографических данных заключается в изменении ширины изображения в интервале 162…826 пикселей и высоты изображения в интервале 58…244 пикселя. В то время как у сгенерированных данных ширина и высота изображения ГРЗ постоянна и составляет 152 пикселя и 36 пикселей, соответственно. Увеличение ширины и высоты изображения ГРЗ приводит к увеличению суммарного количества пикселей, координаты которых преобразуются в процессе выполнения поворота на определенный угол, а также к росту временных затрат при выполнении операции поворота.

Таким образом, необходимо произвести дополнительную обработку исходных изображений для устранения неоднородности ширины и высоты в пикселях в целях снижения чувствительности алгоритма к размерам исходных изображений, а также временных затрат на выполнение первого этапа формирования обучающей и тестовой выборок. Следует отметить, что изменение размера исходных изображений (в пикселях) на первом этапе не окажет существенного влияния на суммарные временные затраты выполнения обоих этапов формирования обучающей и тестовой выборок. Это объясняется тем, что хотя использование операции приведения исходных изображений к единому размеру (в пикселях) и увеличит временные затраты на выполнение первого этапа, но зато при этом сократится время выполнения второго этапа (и наоборот).

В результате выполнения алгоритма формируется иерархия из 360 подкаталогов, каждый из которых содержит 137 изображений, повернутых на угол, значение которого совпадает с именем подкаталога. Такая иерархия позволяет упростить дальнейшее формирование обучающей и тестовой выборок, так как совокупность изображений, повернутых на определенный угол, находится в соответствующем этому углу подкаталоге.

В результате такой структуры размещения изображений, на втором этапе подготовки обучающей и тестовой выборок, становится возможным в автоматизированном режиме присваивание изображению ГРЗ соответствующего угла поворота. Таким образом, сокращается время разметки изображений (составления пары изображения и угла, на который оно повернуто). При этом, присвоенный угол используется как эталон (ожидаемый ответ от сверточной нейронной сети), с помощью которого определяется доля правильно распознанных углов на обучающей и тестовой выборках.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм поворота изображения государственного регистрационного знака автомобиля, позволяет устранить искажения его символов. Выполненная с помощью алгоритма первичная обработка исходных изображений позволяет сформировать обучающий и тестовый наборы данных (откорректированных изображений и соответствующих значений углов поворота). Реализуемый подход позволяет сократить время разметки изображений (составления пары: изображение и угол, на который оно повернуто). Присвоенный (определенный экспериментально) угол используется в качестве эталона (ожидаемого ответа от сверточной нейронной сети). На основе такого эталона можно оценить долю углов, которые правильно распознаны на обучающей и тестовой выборках. Кроме того, при оценке времени на выполнение алгоритма надо учитывать возможный интервал изменения ширины и высоты исходных изображений. Это связано с тем, что при обработке исходных изображений, размеры которых превышают рассмотренные в экспериментах, возможно значительное увеличение временных затрат. Однако, в случае использования изображений, размеры которых отличаются в большую сторону, повышается точность результата определения угла поворота ГРЗ

Следует добавить, что данный алгоритм не является строго ориентированным на определенную предметную область. Он пригоден для подготовки изображений различных объектов (с целью определения угла их поворота). При этом алгоритм может обрабатывать большое количество исходных изображений (различного качества) за счет простоты дополнения массива исходных изображений новыми элементами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы распознавания номеров автомобилей: программное обеспечение, оборудование, монтаж. URL: https://controlengrussia.com/tehnicheskoe-zrenie/avtomarshal (дата обращения: 14.02.2019).
2. Некоторые аспекты автоматического распознавания автомобильных номеров. URL: https://nordavind.ru/node/110 (дата обращения: 14.02.2019).
3. Преобразование Хафа для поиска прямых. URL: http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Преобразование_Хафа_для_поиска_прямых (дата обращения: 15.02.2019).
4. Сверточная нейронная сеть для разработки системы распознавания и классификации изображений. URL: https://docplayer.ru/58000991-Svertochnaya-neyronnaya-set-dlya-razrabotki-sistemy-raspoznavaniya-i-klassifikacii-izobrazheniy.html (дата обращения: 15.02.2019).
5. Классификация изображений с помощью нейронных сетей. Сжатие и ускорение обученных моделей. Александр Чигорин. URL: https://docplayer.ru/29143388-Klassifikaciya-izobrazheniy-s-pomoshchyu-neyronnyh-setey-szhatie-i-uskorenie-obuchennyh-modeley-aleksandr-chigorin.html (дата обращения: 15.02.2019).
6. Генератор автомобильных номеров. URL: http://gosnomer26.ru/servis/generator-avtomobilnykh-nomerov.html (дата обращения: 05.09.2018).
7. Supervisely - Web platform for computer vision. Annotation, training and deploy. URL: https://supervise.ly (дата обращения: 06.09.2018).
8. Распознавание образов. URL: https://ru.bmstu.wiki/Распознавание_образов (дата обращения: 10.02.2019).
9. Сверточная нейронная сеть. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Свёрточная_нейронная_сеть (дата обращения: 15.02.2019).

УДК 621.396.44

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТЕРА ДЛЯ НАСТРОЙКИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

В. В. Щетинина
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. **В статье говорится о проектировании адаптера, который позволит передавать данные на больших скоростях по интерфейсу SpaceWire. Это может быть актуально для настройки бортовой авиационной аппаратуры на производстве. Целью исследования было выбрать интерфейс, с помощью которого данные будут передаваться на адаптер. Так же одной из главных задач проектирования стала разработка алгоритма, по которому будет производиться форматирование и передача данных. По результатам проектирования получено программное обеспечение для устройства.**

Ключевые слова: интерфейсы, ПЛИС, САПР, адаптер.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-228-232

I. Введение

В настоящее время в авиационной технике использование специализированных интерфейсов становится все более актуальным. Для передачи данных на больших скоростях используются различные стандарты, в том числе и стандарт SpaceWire.

Для контрольно-пультовой аппаратуры необходима передача данных с ПК по интерфейсу SpaceWire.

Передачу данных по интерфейсу SpaceWire с компьютера напрямую осуществить не возможно. Для этого необходим адаптер, который будет преобразовывать сигнал, полученный с компьютера в сигнал, который возможно отправить по интерфейсу SpaceWire.

II. Постановка задачи

Цель исследования разработать такой адаптер, который будет передавать данные на больших скоростях, с наименьшим количеством потерь и на большие расстояния.

III. Теория

1. DS-кодирование

Каналы SpaceWire – это последовательные, высокоскоростные (от 2 до 400 Мб/с) полнодуплексные каналы (DS-линки) типа «точка-точка». Стандарт SpaceWire использует Data-Strobe (DS)-кодирование для передачи данных, которое изображено на рис. 1.

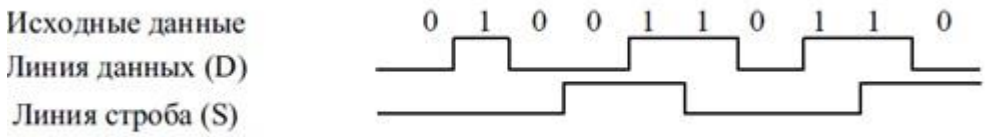


Рис. 1. Data-Strobe (DS)-кодирование

Битовый поток передается кодированием двух сигналов, сигналом данных D и сигналом строба S. Сигнал данных повторяет значение бита данных, т.е. имеет высокий потенциал для бита логической «1» и низкий потенциал для логического «0». Сигнал строба изменяет свое состояние каждый раз, когда состояние линии данных остается неизменным для следующего бита. Таким образом, в DS-линке в каждом битовом интервале происходит изменение уровня сигнала в одной из двух линий, что позволяет приемнику всегда четко определять центр битового интервала для считывания значения бита данных, даже в случае приема большой последовательности бит данных, имеющих одинаковое значение. При этом обеспечивается максимальное использование пропускной способности канала, так как сигнал строба S передается с той же самой частотой, что и биты данных, в отличие от традиционных методов параллельной синхронизации, когда сигнал стробирования имеет удвоенную частоту [1].

2. Кодирование данных

Битовый поток состоит из символов, данных и управления. Тип символа определяется в зависимости от значения флага данные/управление. Структура символа данных показана на рис. 2.

Рис. 2. Символ данных SpaceWire

Символ данных включает в себя бит контроля по четности, флаг данные/управление и восемь бит данных. Значение флага данные/управление равное «0», указывает на то, что данный символ – символ данных. Биты данных передаются младшими разрядами вперед [2].

3. Кодирование символов управления

Управляющий символ состоит из бита контроля по четности, флага данные/управление и двух бит кода управления. Значение флага данные/управление, равное 1, указывает, что данный символ – символ управления. Возможные управляющие символы показаны на рис. 3. Символ расширения ESC используется для создания дополнительных управляющих символов – маркеров.

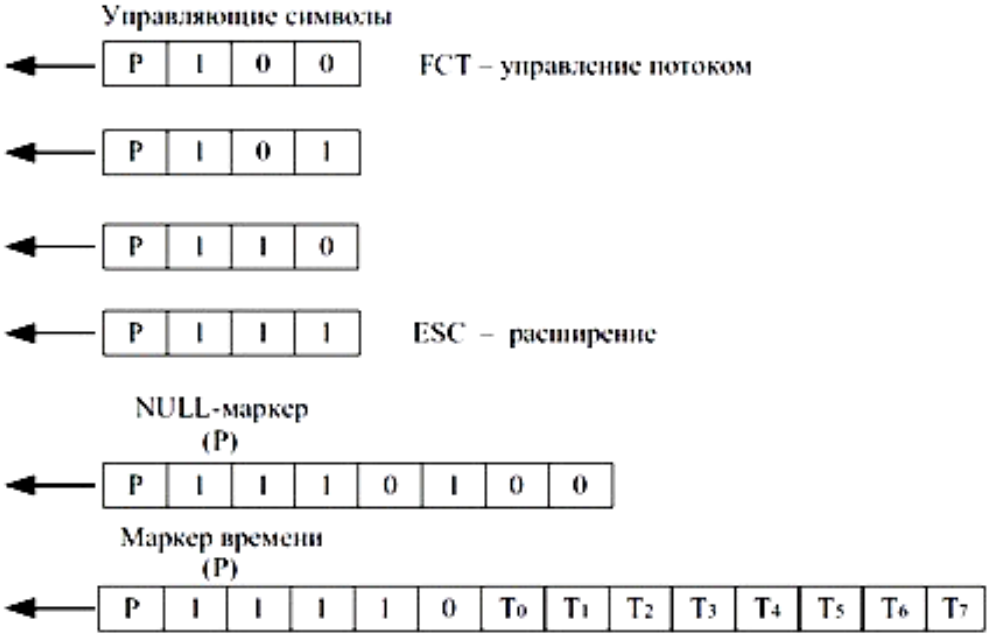


Рис. 3. Управляющие символы SpaceWire

В спецификации SpaceWire символ ESC используется исключительно для формирования NULL-маркера или маркера времени. Все другие применения этого символа считаются некорректными и рассматриваются как ошибка расширения. NULL-маркер состоит из символа расширения ESC и следующим за ним символом управления потоком FCT. Бит контроля по четности P в середине маркера NULL равен 0. NULL-маркер передается всегда при отсутствии передач символов, данных и символов управления

в канале. Это позволяет сохранить активность канала и определить ошибку рассоединения. Маркер времени состоит из символа расширения ESC и символа данных. Бит контроля по четности P в середине маркера времени равен 1. Этот маркер используется для поддержания единого системного времени в сети [3].

4. Контроль по четности для определения ошибок передачи

Бит контроля по четности добавляется в символы данных или управления для определения ошибок передачи по каналу на рис. 1.4. Бит контроля по четности охватывает восемь бит данных предыдущего символа данных или два бита управляющего кода предыдущего символа управления и флаг управления текущего символа, как показано на рис. 4. Бит P используется для проверки нечетности, т. е. количество единичных битов в области охвата бита контроля по четности (включая сам бит P) должно быть нечетным [4].

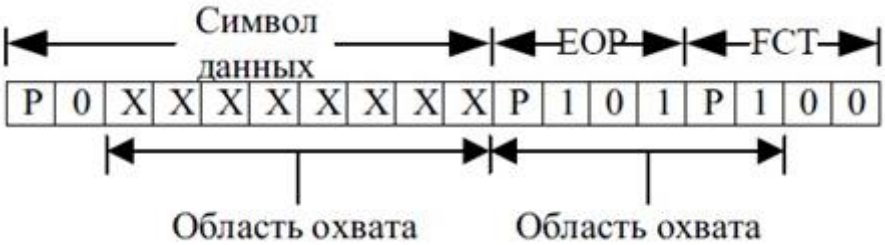


Рис. 4. Область, охватываемая битом контроля по четности

5. Канальные и информационные символы

На уровне обмена данные и команды разделяют на два типа:

– L-символы или канальные символы;

– N-символы или обычные символы.

Канальные символы используются только лишь уровнем обмена, чтобы управлять состоянием канала (линка) и не передаются на уровень пакетов. К канальным символам относятся символы: FCT и ESC. NULL-маркер (ESC + FCT) и маркер времени (ESC + символ данных) также являются канальными символами (они не передаются на уровень пакетов и носят служебный характер). Обычные символы – это информационные символы, которые передаются на уровень пакетов: символы данных и символы окончания пакета (EOP и EEP). От процессорного модуля к передатчику канала могут быть переданы только N-символы. При передаче по каналу использую как N-символы, так и L-символы, а конечному принимающему узлу (через его приемник канала) поступают только N-символы. Принятый приемником канала символ не обрабатывается дальше до тех пор, пока не будет получен и проверен проверяющий его бит контроля по четности, находящийся в следующем символе[5].

IV. Результаты экспериментов

Для выбора интерфейса передачи с компьютера на адаптер был произведен анализ нескольких интерфейсов. В табл. 1 приведена сравнительная характеристика этих интерфейсов.

ТАБЛИЦА 1
ВЫБОР ИНТЕРФЕЙСА

Наименование характеристики	USB 2.0	RS-232	Ethernet
Скорость	До 480 Мбит/с	До 0,02 Мбит/с	До 1 Гбит/с
Расстояние	До 25 м	До 8 м	До 200 м
Размер кадра	До 1024 байт	7..11 бит	До 1536 байт

Главным критерием при выборе интерфейса является скорость передачи данных. Применение интерфейса Ethernet позволит передавать данные с наибольшей скоростью. Что для разрабатываемого адаптера является одним из основных критериев. Размер кадра, так же важен для этого устройства, поэтому целесообразным будет применение интерфейса Ethernet [6].

Для разрабатываемого адаптера необходимо выбрать отладочный комплект на базе ПЛИС, в которой есть возможность реализации интерфейса Spacewire, за счёт LVDS выводов. Отладочный комплект должен быть оснащен интерфейсом Ethernet, Jtag. Необходимо чтобы скорость Ethernet была максимально возможной, этим требованиям соответствует отладочный комплект фирмы Altera на базе ПЛИС MAX 10.

В графическом редакторе САПР Quartus II была разработана схема адаптера рис. 5. На базе ПЛИС было реализовано ядро m10_rgmii_v процессора на языке Verilog.

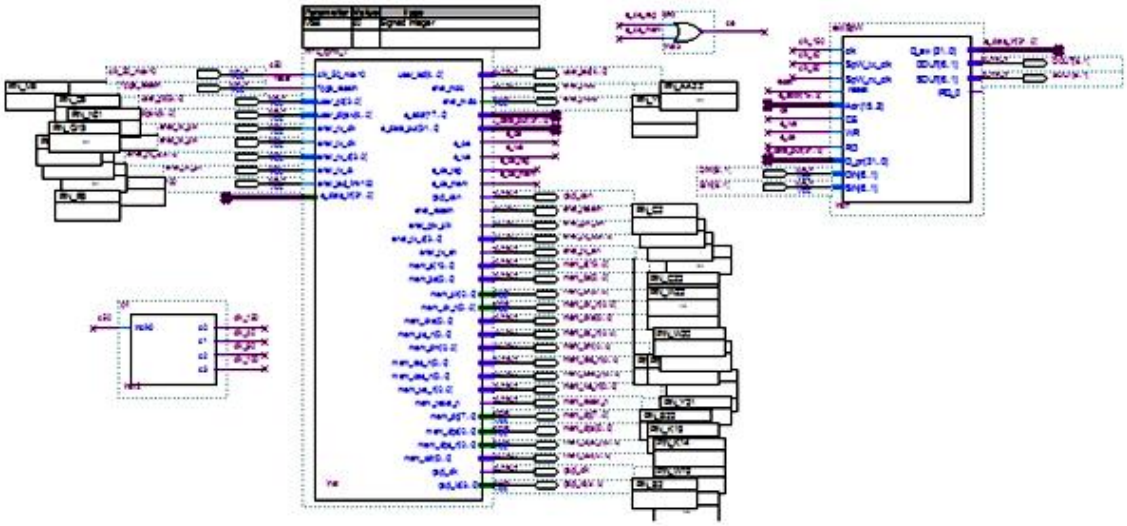


Рис. 5. Схема адаптера

В Spacewire модуле используется 6 одинаковых IP ядер, каждое из которых является как входным, так и выходным каналом Spacewire, а также написана программа на языке vhdl, которая объединяет каналы Spacewire в графическом представлении проекта. В программе используется функция чтения и записи данных. Функция универсальная, позволяет, как записывать данные в канал Spacewire, так и считывать данные, которые получены по этому каналу. На рис. 6 приведен алгоритм функции.

Программа осуществляет поиск свободного буфера для передачи данных, запись данных в буфер, проверку поступившего кадра, определение номера канала и его адреса для записи информации в кадр.

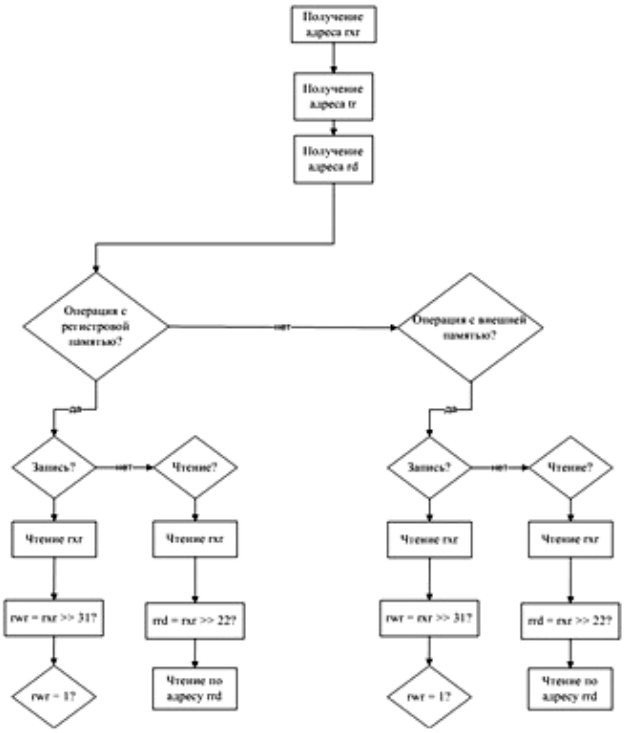


Рис. 6. Универсальный алгоритм

V. Обсуждение результатов

Разработанное устройство позволяет передавать данные на достаточно больших скоростях, что позволяет приблизить условия работы бортовой аппаратуры к реальным и осуществить более точную проверку работы устройства.

VI. Выводы и заключение

В ходе проектирования устройства были рассмотрены различные интерфейсы компьютерных систем. Написано ПО для отладочной платы, на базе которой разработан адаптер, разработано ПО для ядра, реализованного на базе ПЛИС, так же разработано ПО для управления адаптером. Параметры адаптера удовлетворяют необходимым требованиям.

Список литературы

1. Горбачев С. В., Игнатьев М. Б., Киселев В. А., Михайлуца К. Т., Шейнин Ю. Е. Технология SpaceWire в интегрированной модульной авионике // Актуальные научно-технические и организационно-экономические проблемы разработки и реализации технических решений в отечественном авиаприборостроении: труды III-й Всерос. науч.-техн. конф. национальной ассоциации авиаприборостроителей. СПб., 2000. С. 32–34.

2. ECSS-E-ST-50-12C. SpaceWire Standard. ECSS – Space Engineering, 31 July 2008. 129 p.

3. IEEE Computer Society, IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect. Board Approval 1995-09-21.

4. Гук М. Г. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. СПб.: Питер, 2002. 528 с.

5. Кучерявый А. А. Бортовые информационные системы. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 504 с.

6. Щетинина В. В. Выбор интерфейса для адаптера SpaceWire // Современные научные исследования и разработки (том 3): материалы междунар. (заочной) научно-практич. конф. / Под общ. ред. А. И. Вострецова. Прага: Vydavatel «Osviceni», Нефтекамск: РИО НИЦ «Мир Науки», 2017. С. 11–13.