

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Обзор методов и алгоритмов сжатия речевой информации в системах цифровой радиосвязи	
С.Л. Подвальный, А.Д. Рошупкин.....	7
Автоматизированная информационная система цифрового моделирования стационарных случайных процессов алгоритмами непрерывных дробей	
М.А. Новосельцева, Т.А. Хорошева, С.Г. Гугова.....	14
Оптимизационное моделирование при принятии решений по формированию бюджета развития образовательной организации на основе мониторинговой информации	
В.Н. Кострова, Н.А. Лешева, Ю.С. Сахаров, С.О. Сорокин	20
Разработка программного обеспечения для систем управления устройств цифрового синтеза сигналов	
Д.Н. Донских, С.А. Попов, А.В. Юрьев, В.Ф. Барабанов, С.В. Тюрин.....	25

Энергетика

Методы повышения энергоэффективности компрессорных станций с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами на стадии реконструкции	
Л.В. Булыгина, В.И. Ряжских.....	32
Аппаратная реализация быстродействующего датчика тока для АСУЭ с высоковольтными регуляторами переменного напряжения	
В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов.....	40
Применение кавитационной модели Релея-Плессета для исследования течения криогенной жидкости в трактах шнекоцентробежного насоса	
А.А. Афанасьев, Ю.В. Демьяненко, А.Н. Попков.....	44
Автоматизированное адаптивное управление возбуждением сегментных генераторов путем изменения воздушного зазора	
А.М. Литвиненко, А.Б. Кирилов, М.А. Чурсин.....	50

Радиотехника и связь

Генератор модулированных по частоте прямоугольных импульсов в субмикронном технологическом базисе	
Е.Б. Барбарина, Д.В. Шеховцов, А.И. Мушта.....	55
Исследование вариантов подавления помех усилителями биопотенциалов	
Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов.....	58
Метод повышения разрешающей способности и помехоустойчивости импульсных сигналов в средствах нелинейной радиолокации	
А.В. Волков, В.М. Питолин, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет.....	66
Методика оценки электромагнитных характеристик печатных плат в закрытых конструкциях	
В.В. Глотов, М.А. Ромашенко.....	71
ЧМ генераторы информационно-телекоммуникационных систем на резонаторах и узкополосных фильтрах на поверхностных акустических волнах	
М.И. Бочаров, А.О. Рыжов.....	75
Методика оценки отражательной способности зеркальной антенны, расположенной под укрытием с поглощающей плазмой	
А.В. Исайкин, О.А. Соколова.....	80

Макромодель стабилитрона с повышенной точностью моделирования А.А. Осыкин, А.В. Русанов, Ю.С. Балашов.....	86
---	----

Машиностроение и машиноведение

Влияние микроструктуры контактных поверхностей на образование соединения при диффузионной сварке титана В.В. Пешков, А.Б. Булков, С.М. Ларсов.....	91
Расчет энергосиловых параметров скоростного ортогонального резания Ю.А. Цеханов.....	96
Влияние геометрии деталей из титана и схемы их нагружения при сварке на формирование дефектов в соединениях М.В. Семенов.....	100
Ползучесть слоистых микроструктурных композитов В.В. Пешков, А.Б. Булков.....	104
Оптимизация технологических процессов электрохимической обработки деталей машин А.А. Болдырев, А.И. Болдырев, А.В. Мандрыкин, А.В. Перова.....	107
Усовершенствование математических моделей формообразования червячных колес с учетом равномерного припуска при обработке О.И. Попова, А.В. Кривошея, М.И. Попова.....	114
Повышение эффективности производства посредством изменения системы оплаты труда О.О. Шендрикова, М.С. Луценко.....	122
Комбинированная обработка прессованных материалов В.П. Смоленцев, С.С. Юхневич, В.Л. Мозгалин.....	128
Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский.....	132

Физика

Полимерные покрытия с комплексом ингибиторов коррозии для регулируемой защиты изделий различного назначения Д.Е. Барабаш, Д.А. Забелин.....	140
Закономерности атомной структурной самоорганизации модели металлического стекла железа в условиях одноосного нагружения Д.Г. Дунаев, А.Т. Косилов, В.В. Ожерельев.....	147

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Review of methods and algorithms of speech information compression in digital communication systems	
S.L. Podvalny, A.D. Roshupkin.....	7
Automated information system of digital simulation of stationary random processes by algorithms of the continued fractions	
M.A. Novoseltseva, T.A. Khorosheva, S.G. Gutova.....	14
Optimization modeling in decision-making process in budgeting of the educational organization development on the basis of monitoring information	
V.N. Kostrova, N.A. Leshcheva, S.O. Sorokin, Y.S. Sakharov.....	20
Development of the software for control system for the digital signal synthesizers	
D.N. Donskih, S.A. Popov, A.V. Yurev, V.F. Barabanov, S.V. Tyurin.....	25

Energetics

Methodology for improving the efficiency of compressor stations with gas turbine gas compressor units under the reconstruction	
L.V. Bulygina, V.I. Ryazhskikh.....	32
Hardware solution for a quick-sensing current sensor for automated control system of power consumption with high voltage ac regulators	
V.N. Krysanov, Y.V. Sharapov.....	40
Application of rayleigh-plesset cavitation model for the analysis of cryogenic fluid flow within the paths of two stage pump	
A.A. Afanasyev, Y.V. Demyanenko, A.N. Popkov.....	44
Automatic adaptive drive control over excitation of segment generators by air gap change	
A.M. Litvinenko, A.B. Kirilov, M.A. Chursin.....	50

Radio engineering and communication

The generator of frequency modulated rectangular pulses applied to the sub-micron technological base	
E.B. Barbarina, D.V. Shekhovtsov, A.I. Mushta.....	55
Variety study of emergency interference biopotentials	
D.V. Zhuravlev, Y.S. Balashov.....	58
The method of increasing the resolving capability and noise resistance signals in nonlinear radar	
A.V. Volkov, V.M. Pitolin, S.N. Panychev, N.A. Samotsvet.....	66
Assessment method of electromagnetic performance of printed circuit boards in closed structures	
V.V. Glotov, M.A. Romashchenko.....	71
Fm generators of information-telecommunication systems applied to resonators and narrow filters on surface acoustic waves	
M.I. Bocharov, A.O. Ryzhov.....	75
Methodology for evaluating the reflective capacity of mirror antenna with absorbing plasma, located under the shell	
A.V. Isaykin, O.A. Sokolova.....	80
Spice model of stabilatron with increased accuracy modeling	
A.A. Osykin, A.V. Rusanov, Y.S. Balashov.....	86

Mechanical engineering and science of machines

The effect of contact surfaces microstructure on the joint formation at diffusive welding of titanium	
V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, S.M. Larsov.....	91
Calculation of energy-power parameters of high-speed orthogonal cutting	
Y.A. Tsekhanov.....	96
Influence of the geometry of titanium parts and loading diagram during welding on the formation of defects in joints	
M.V. Semenzhenkov.....	100
Creep of microstructural layered composites	
V.V. Peshkov, A.B. Bulkov.....	104
Processing optimization for elements electrochemical machining	
A.A. Boldyrev, A.I. Boldyrev, A.V. Mandrykin, A.V. Perova.....	107
Improvement of mathematical models for worm gears formation subject to even allowance at processing	
O.I. Popova, A.V. Krivosheya, M.I. Popova.....	114
Increase of production efficiency by means of changing the system of remuneration of labor	
O.O. Shendrikova, M.S. Lutsenko.....	122
Combined processing of extruded materials	
V.P. Smolentsev, S.S. Yuhnevich, V.L. Mozgalin.....	128
Influence of gas-saturated layers and oxide films on the impact toughness of titanium alloys of different strength	
A.B. Kolomensky, S.V. Shakhov, B.A. Kolomensky.....	132

Physics

Polymeric coatings with corrosion inhibitors complex for adjustable protection of products of different functions	
D.E. Barabash, D.A. Zabelin.....	140
Laws of atomic structural self-organization of the iron metallic glass model under condition of uniaxial loading	
D.G. Dunaev, A.T. Kosilov, V.V. Ozherelyev.....	147

ОБЗОР МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

С.Л. Подвальный, А.Д. Рощупкин

Данная статья представляет собой обзорный анализ существующих методов и алгоритмов сжатия речевой информации. В статье раскрывается актуальность и необходимость развития средств информационного обмена. Показано, что наиболее естественной и удобной формой информационного обмена являются речевые сообщения. Таким образом, автор подводит к мысли, что повышение эффективности передачи речевых сообщений посредством радиосвязи способствует развитию информационной сферы деятельности человека, которая, в свою очередь, является определяющим фактором развития оборонного, интеллектуального и экономического потенциала государства и человеческого общества в целом.

В статье подробно рассматриваются основные направления кодирования речи, методы кодирования формы сигнала и алгоритмы кодирования источника сигнала. Перечислены и проанализированы основные типы вокодеров, представлена их классификация, описаны основные характеристики и области применения. Сформулирована основная задача алгоритмов сжатия речевых сигналов, показана их практическая эффективность на примере цифровой радиостанции, организующей канал передачи данных. Продемонстрирована актуальность разработки новых высокоэффективных алгоритмов сжатия, открывающих перспективы для развития средств цифровой радиосвязи

Ключевые слова: речевой сигнал, кодирование, декодирование, кодек, сжатие, вокодер

Вводная часть. В настоящее время смело можно утверждать, что информационная сфера деятельности человека является определяющим фактором развития оборонного, интеллектуального и экономического потенциала государства и человеческого общества в целом. Для развития данной сферы деятельности средства информационного обмена должны обеспечивать прием и передачу больших объемов данных вне зависимости от местонахождения человека. Так же происходит повышение интенсивности информационного обмена на основе речевых сообщений. Это обусловлено тем, что речевые сообщения являются наиболее естественной и удобной формой информационного обмена. Одним из вариантов решения поставленной задачи является организация средств радиосвязи.

С момента зарождения радиосвязи ведутся научно-исследовательские работы по совершенствованию средств связи. На сегодняшний день передовыми средствами связи являются системы аналоговой и цифровой радиосвязи. Цифровая связь повсеместно используется для передачи аналоговых сигналов (например речь). Цифровые системы радиосвязи позволяют разрабатывать алгоритмы шифрования данных (с целью обеспечения сокрытия передаваемой информации), алгоритмы помехоустойчивого кодирования (для борьбы с возникающими в канале связи ошибками), алгоритмы сжатия данных (в целях эффективного описания исходной информации, как следствие - снижения требований к памяти и полосе частот, связанных с хранением и

передачей дискретных реализаций исходных данных) [42]. Цифровая радиосвязь как средство интенсивного информационного обмена в сфере деятельности человека имеет ряд проблем: ограниченность частотного ресурса, ограниченность пропускной способности канала связи, дальность связи и другие.

Таким образом, с целью совершенствования цифровых средств радиосвязи разработка эффективных алгоритмов сжатия речевых сигналов является актуальной научно-исследовательской задачей.

Основная часть. Основные элементы цифровой системы радиосвязи, в том числе и алгоритмы сжатия речевой информации в виде кодера, обобщенно показаны на рис. 1, где в качестве источника информации выступает аналоговый речевой сигнал.

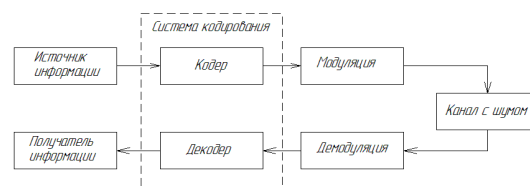


Рис. 1. Структурная схема
цифровой системы радиосвязи

Основная задача алгоритмов сжатия речевых сигналов это предельно возможное сжатие сигнала, представленного в цифровой форме, другими словами, предельно возможное устранение избыточности речевого сигнала, но при сохранении приемлемого качества передачи речи. Компромисс между степенью сжатия и сохранением качества выбирается исходя из требований к разрабатываемому техническому средству, а

проблема получения высокой степени сжатия без чрезмерного снижения качества составляет основную трудность при разработке алгоритмов сжатия.

Максимально возможная пропускная способность канала связи не зависит от способа физического кодирования, так как определяет возможности линии при гипотетическом наилучшем способе кодирования. Практическая пропускная способность канала существенно зависит от способа физического кодирования информации. Одна и та же линия связи может иметь разную пропускную способность при разных способах кодирования. При этом необходимо стремиться выбрать способ кодирования так, чтобы максимально использовать возможности линии [36]. Приведем пример, две одинаковые приемо-передающие станции УКВ диапазона работают в равных условиях, однако, одна станция передает речевые сигналы в цифровом канале на скорости 4,8 кбит/с, а другая станция на скорости 2,4 кбит/с. При одной и той же пропускной способности канала связи, например 4,8 кбит/с, цифровой поток речевого сигнала с меньшей скоростью может быть повторно закодирован избыточными помехоустойчивыми кодами. В результате чего, на приемной стороне цифровой поток со скоростью 2,4 кбит/с может быть принят на более удаленном расстоянии от источника сигнала [28]. Другими словами, низкоскоростные кодеры обеспечивают более надежную связь при канальных помехах. Помимо этого эффективные низкоскоростные кодеры обеспечивают более высокое качество речи при работе в сильно зашумленных окружающих условиях. Кодирование речи с низкой скоростью уменьшает объем цифровой информации, требуемой для реализации речевых сообщений [33].

Направления кодирования речевых сигналов.

Исторически сложилось два основных направления кодирования речи: кодирование формы сигнала и кодирование источника сигнала.

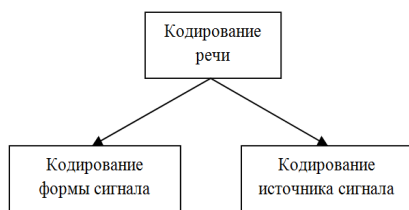


Рис. 2. Направления кодирования речевых сигналов

Метод кодирования формы сигнала (рис. 3) основан на использовании статистических характеристик сигнала и практически не зависит от механизма формирования сигнала. Кодеры этого типа обеспечивают высокое качество передачи речи (разборчивость и натуральность речи), но отличаются меньшей по сравнению с методом кодирования источника сигнала экономичностью.

Самый распространенный представитель данного направления кодирования это аудиокодек G.711 - стандарт для представления восьми битной компрессии голова типа Pulse Code Modulation с частотой дискретизации 8000 раз в секунду и объемом 8 бит на отсчет. Таким образом, G.711 кодек создаёт поток около 64 кбит/с.

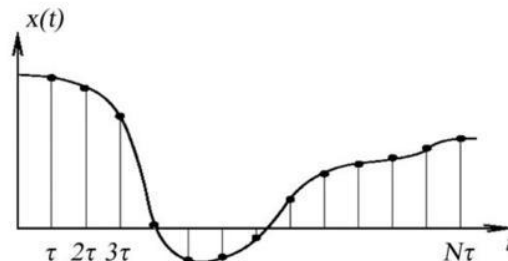


Рис. 3. Визуальное представление метода кодирования формы сигнала

Метод кодирования источника сигнала подразумевает кодирование параметров сигнала и основывается на известных данных о механизмах речеобразования. Другими словами, анализируется модель голосового тракта, которая приводит к системам анализ-синтез, получившим название вокодерных систем [43]. На сегодняшний день в системах цифровой радиосвязи используется преимущественно вокодерные системы, как более экономичные с приемлемым качеством передачи речи.

Классификация вокодеров.

Все существующие на сегодняшний день вокодеры можно разделить на два основных класса: речезлементные и параметрические.

В речезлементных вокодерах при передаче распознаются произнесенные элементы речи (фонемы), и передаются только их условные номера.

В параметрических вокодерах из речевого сигнала выделяют два типа параметров:

- параметры, характеризующие огибающую спектра речевого сигнала, (фильтровую функцию);
 - параметры, характеризующие источник речевых колебаний (генераторную функцию).
- Основные параметры – моменты появления и исчезновения основного тона, моменты появления и исчезновения шумового сигнала, частота основного тона, ее изменение во времени. После по этим параметрам на приеме синтезируют речь [34].

По принципу определения параметров фильтровой функции речи выделяют следующие вокодеры:

- ортогональные;
- полосные канальные;
- липредеры;
- формантные;
- гомоморфные.

Ортогональные вокодеры. Огибающая мгновенного спектра в ортогональных вокодерах раскладывается в ряд по выбранной системе ортогональных базисных функций. Вычисленные коэффициенты этого разложения передаются на

приемную сторону. Широкое распространение получили гармонические вокодеры, использующие разложение в ряд Фурье.

Рассмотренные вокодеры обеспечивают сжатие сигнала до 1200 - 4800 бит/с, позволяя восстановить в декодере частоту основного тона с дискретностью в несколько герц и с невысокой точностью огибающую спектра сигнала с периодом изменения 16-40 мс, при этом даже при достаточно высокой разборчивости речи теряются многие индивидуальные особенности диктора.

Из-за сложности определения параметров генераторной функции появились полувокодеры (Voice Excited Vocoder, VEV), в которых вместо сигналов основного тона используется полоса речевого сигнала до 800 - 1000 Гц, которая кодируется, например, адаптивная дискретная импульсная кодовая модуляция, и вместо характеристик основного тона передается на выход кодера. Такой алгоритм позволяет сжать речь до 4800-9600 бит/с, сохраняя генераторную функцию гортани (частоту и закон изменения основного тона) диктора.

Полосные вокодеры. В полосных вокодерах спектр речи делится на определенное количество полос (каналов) аналоговыми или цифровыми полосовыми фильтрами. Большее число каналов в вокодере дает большую натуральность, качество и разборчивость речи. С каждого полосового фильтра сигнал поступает на детектор и фильтр низких частот с частотой среза F_{cp} . Таким образом, сигналы на выходе каждого канала изменяются с частотой менее F_{cp} . Их передача возможна в аналоговом или цифровом виде.

Полосные вокодеры различных типов способны сжимать речевые сигналы в диапазоне 2400 - 9600 бит/с. Для данного типа вокодеров качество речи монотонно зависит от скорости передачи. Так, лучше всего вокодеры звучат при скорости потока 9600 бит/с, а при скорости 2400 бит/с речь для большинства слушателей становится почти неразборчивой.

Липредеры. Вокодеры с линейным предсказанием (LPC – Linear Prediction Coding) или липредеры основаны на оригинальном математическом аппарате. При кодировании с линейным предсказанием моделируются различные параметры человеческой речи, которые передаются вместо отсчетов или их разности, требующих значительно большей пропускной способности канала. Следует заметить, что буферы, необходимые для хранения потоков данных, увеличивают задержку кодирования.

Данные вокодеры обеспечивают сжатие сигнала до скорости 1000 бит/с, с приемлемым уровнем разборчивости.

Основным недостатком низкоскоростных LPC вокодеров данного типа является высокая чувствительность субъективного качества синтезированной речи к ошибкам в расчете параметров возбуждения синтезирующего фильтра, а также к амплитудно-частотным искажениям

спектра входной речи. Это является следствием несовершенства функциональной модели вокодера и ограниченного объема передаваемой информации. Прямая оценка параметров возбуждения, без коррекции на основе сравнения синтезированного сигнала с исходным сигналом, приводит к тому, что даже единичные ошибки в оценке спектральной огибающей сигнала, частоты основного тона, границ озвученных участков и. т. д. хорошо заметны на слух. Низкоскоростные LPC вокодеры, в отличие от CELP вокодеров, не сохраняют форму волны передаваемого сигнала, лишая возможности введения простого критерия оценки ошибки во временной области в виде энергии взвешенного разностного сигнала [21].

Формантные вокодеры. В формантных вокодерах огибающая спектра речи описывается комбинацией формант (резонансных частот голосового тракта). Основные параметры формант – центральная частота, амплитуда и ширина полосы частот.

Исходя из этого, при использовании формантного вокодера по каналу связи нужно передать дискретизированные по времени и квантованные по амплитуде величины.

Учитывая плавность изменения во времени выше перечисленных сигнальных параметров, дискретизацию можно проводить с частотой 40 Гц, квантование в среднем 16 уровнями (4 бита), а частоты основного тона - 128 уровнями (7 бит), что в сумме потребует канала связи с пропускной способностью, равной 1700 бит/с.

На одном из вокодеров формантного типа со скоростью 1200 бит/с получена слоговая разборчивость высокого уровня. Разборчивость речи при использовании формантных вокодеров и передаче со скоростью 2400 бит/с превышает разборчивость обычной телефонной связи [32].

На приемном конце линии связи при восстановлении (синтезе) речи, применяются управляемые формантные контуры, генератор шума, модуляторы, сумматоры.

Гомоморфные вокодеры. Гомоморфная обработка позволяет разделить генераторную и фильтровую функции, образующие речевой сигнал.

Гомоморфная обработка речевого сигнала приводит к весьма удобному описанию, где основные параметры сигнала отделены друг от друга, т. е. информация о сигнале возбуждения расположена в области больших времен, а информация о речевом тракте и форме импульса возбуждения – в области малых времен. Кепстр (термин «кепстр» является в настоящее время общепринятым для обозначения обратного преобразования Фурье логарифма спектра мощности сигнала; «комплексный кепстр» означает комплексный логарифм).

Зависящий от времени комплексный спектр фактически содержит ту же информацию, что и текущий спектр сигнала, который, в свою очередь, является точным описанием речевого сигнала. Кепстральное представление, однако, не использует

информации о фазе сигнала, содержащейся в преобразовании Фурье, и поэтому кратковременный кепстр не позволяет единственным образом описать речевое колебание. Тем не менее, на основе кепстра можно оценить формантные частоты, период основного тона и классифицировать сигнал как вокализованный или невокализованный.

В гомоморфном вокодерке кепстр вычисляется 1 раз через каждые 10 – 20 мс. Период основного тона и признак тон/шум оцениваются по кепстру, а компоненты кепстра в области малых времен (примерно первые 30 отсчетов) квантуются и кодируются для передачи или хранения. По квантованным отсчетам кепстра в области малых времен в синтезаторе восстанавливается импульсная реакция и вычисляется свертка с функцией возбуждения, которая была восстановлена в синтезаторе по информации об основном тоне, признаке тон/шум и соответствующих амплитудах [43].

Характеристики вокодеров. Качество речи вокодеров является монотонной функцией от скорости передачи. На рис. 4 наглядно представлена зависимость качества речи от скорости передачи речевых данных. Помимо этого, эффективность работы вокодеров напрямую зависит от задержки в обработке и от производительности вычислительных систем.

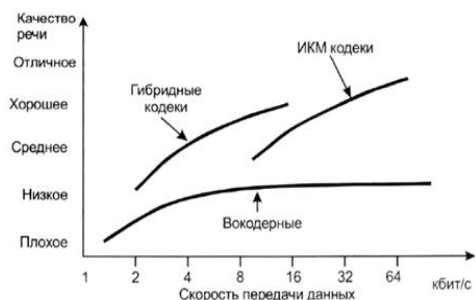


Рис. 4. Зависимость качества работы вокодера от скорости передачи данных

В настоящее время большинство вокодеров работают на фиксированной скорости вне зависимости от характеристик входного сигнала, однако целью современных разработок являются вокодеры с переменной скоростью. Общим решением является использование фиксированной скорости для речи и низкой скорости для фоновых шумов. Способ выполнения механизма сжатия пауз важен для повышения качества передачи речи, однако часто выигрыш от компрессии пауз не реализуется. Проблемой является то, что при больших фоновых шумах сложно провести различия между речью и шумом [29]. Другая проблема заключается в том, что если механизм сжатия пауз неправильно выявил состояние речи, начало речи может быть потеряно, что значительно ухудшает разборчивость кодированной речи. Способ

генерации комфортного шума должен быть таким, чтобы кодер и декодер оставались синхронизированными, даже если в течение некоторого интервала времени передача данных не осуществляется. Это позволяет сгладить переходы между сегментами активной и неактивной речи.

Вокодеры часто выполняются на основе цифровых сигнальных процессоров. В соответствии с компьютерной терминологией их производительность может быть измерена в млн. операций в секунду, объеме памяти с произвольным доступом к оперативной памяти и объеме постоянной памяти. Производительность определяет стоимость вокодера, поэтому при определении типа вокодера для тех или иных приложений разработчик должен сделать соответствующий выбор. В случаях, когда вокодер совместно использует процессор с другими приложениями, разработчик должен решить, сколько ресурсов можно выделить для вокодера. Вокодеры, использующие менее 15 млн. операций в секунду, считаются низкопроизводительными, использующие 30 или более млн. операций в секунду являются высокопроизводительными [35]. Однако увеличение производительности приводит к увеличению стоимости и большим затратам энергии. Энергетические затраты важны для приложений в портативной аппаратуре, так как при больших затратах энергии сокращается время между подзарядками батарей или возникает необходимость использовать батареи большей емкости, что, в свою очередь, приводит к большей цене и весу. Однако, обеспечить устойчивую радиосвязь на больших расстояниях связи, только за счет применения высокоэффективных алгоритмов сжатия речи, так же не менее важная задача.

Заключительная часть. Приведенный в статье обзорный анализ методов и алгоритмов сжатия речевой информации показал, что развитие средств цифровой радиосвязи, влекущее за собой развитие информационной сферы деятельности человека, открывает широкие перспективы для дальнейшего использования и внедрения новых алгоритмов сжатия речи.

Основной проблемой реализации информационного обмена является ограниченность ресурсов технических средств связи (пропускная способность канала связи, объемы памяти, производительность). Поэтому не вызывает сомнения необходимость выбора такого способа сжатия речевой информации, который обеспечивает минимум объемов битовых представлений хранимых и передаваемых речевых данных при сохранении приемлемого, с точки зрения пользователя, качества воспроизведения исходных речевых сообщений. Именно это является предметом дальнейших научных исследований.

Литература

1. Atal, B. S. Speech Analysis and Synthesis by Linear Prediction of the Speech Wave / B. S. Atal, J. Acoust // Soc. Am. – 1990. – vol. 65. – p. 47.
2. Atal, B. S. Efficient vector quantization of LPC parameters at 24 bits/frame / B. S. Atal, J. R. Remde // International conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1993. – vol. 6. – № 2. – p.13.
3. Barnwell, T. An Improved Mixed Excitation Linear Prediction (MELP) Coder / T. Barnwell, T. Unno, K. Truong // Proc. of ICASSP-99. – 1999. – pp. 245-248.
4. Deller, J. R. Discrete-Time Processing of Speech Signals / J. R. Deller, J. G. Proakis, J. H. L. Hansen // Macmillan Publishing Company, New York, NY. – 1993. – p. 167.
5. Fant, G. C. Acoustic Theory of Speech Production / G. C. Fant // Mouton and Co.,s - Gravenhage, The Netherlands. – 1990. – p. 81.
6. Flanagan, J. L. Source-System Interactions in the Vocal Tract / J. L. Flanagan // Ann. New York Acad. Sci. – 1998. – vol. 155. – pp. 9-15.
7. Hauenstein, M. On the application of a psychoacoustically motivated speech-quality measure in CELP speech-coding / M. Hauenstein, N. Goertz // In the proc. Of the 9 European Signal processing conference. – 1998. – pp. 1421-1424.
8. Markel, J. D. Formant Trajectory Estimation from a Linear Least-Squares Inverse Filter Formulation / J. D. Markel // Speech Communications Research Laboratory, Santa Barbara, California. – 1991. – № 3. – p. 248.
9. Moon, T. K. Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing / T. K. Moon, W. C. Stirling // Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. – 2000. – p. 127.
10. The New Federal Standard at 2400 bps / A. V. McCree, L. M. Supplee, R. P. Cohn, J. S. Collure // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1997. – pp. 21-49.
11. A 2.4 kbit/s MELP Coder Candidate for the New U. S. Federal Standard / A. V. McCree, K. Truong, E. George and others // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1996. – pp.200-203.
12. Rabiner, L. R. Fundamentals of Speech Recognition / L. R. Rabiner B. H. Juang // Prentice-Hall International, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. – 1993. – vol. 5. – pp. 384-407.
13. Rose, R. C. Design and Performance of an Analysis-by-Synthesis Class of Predictive Speech Coders [Text] / R. C. Rose, T. P. Barnwell // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1990. – vol. 38. – № 9. – p.93.
14. Tuan, V. N. Robust Glottal Closure Detection Using the Wavelet Transform / V. N. Tuan, C. d'Alessandro // European Conference on Speech Communication and Technology, Budapest, Hungary. – 1999. – pp. 2805-2808.
15. Wang, C. Robust Pitch Tracking for Prosodic Modeling in Telephone Speech / C. Wang, S. Seneff // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 2000. – vol. 3. – pp. 1343-1346.
16. Yang, W. Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMDSD): An Objective Speech Quality Measure Based On Audible Distortion And Cognition Model / W. Yang // A Dissertation of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy. – 1999. – p.207.
17. Yeldener, S. A 4 kb/s Toll Quality Harmonic Excitation Linear Predictive Speech Coder / S. Yeldener // International Conference on Spoken Language Processing. – 1996. – pp. 481-484.
18. Ying, G. S. A Probabilistic Approach to AMDF Pitch Detection / G. S. Ying, L. H. Jamieson, C. D. Michell // International Conference on Spoken Language Processing. – 1996. – pp. 1201-1204.
19. Андреев, И. В. Реализация многоканальных речевых CELP кодеков на DSP TMS320 / И. В. Андреев, В. В. Бабкин, А. Е. Знамеровский // Цифровая обработка сигналов и ее применение: 2-я междунар. конф. – М.: Стандартинформ, 1999. –Т.2. С. 283-287.
20. DSP для систем IP-телефонии / И. В. Андреев, В. В. Бабкин, А. В. Кондронский, А. В. Заборовский, А. Е. Знамеровский // Исследования в области DSP: 3-я европейская конф. – М.: Стандартинформ, 2000. –Т.1. С. 85-89.
21. Бабкин, В. В. LPC вокодер 1000-1200 бит/с / В.В. Бабкин // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSP-2000): труды 3-ей междунар. конф.– М., 2000. С. 8.
22. Бабкин, В. В. Сравнение помехоустойчивости различных алгоритмов оценки периода основного тона речи / В. В. Бабкин // 54-я НТК: тез. докл. СПб.: СПб. ГУТ, – 2001. – 98 с.
23. Бабкин, В. В. Архитектура модуля обработки сигналов двухканального шлюза ЕР-телефонии / В. В. Бабкин // Техника и технология связи: 2-я междунар. НТК. СПб.: СПб. ГУТ, –2000. –75 с. (опубликована в журнале "Электросвязь" №7, 2000).
24. Бабкин, В. В. Реализация двухскоростного CELP вокодера на цифровом сигнальном процессоре ADSP-2181 / В. В. Бабкин // 52-я НТК: тез. докл. СПб.: СПб. ГУТ, – 1999. – 37 с.
25. Быков, С. В. Цифровая телефония: учеб. пособие для вузов / С. В. Быков, В. И. Журавлев, И. А. Шалимов. М.: Радио и связь, 2003. – С. 66-72.
26. Галушкин, А. И. Теория нейронных сетей: учеб. пособие для вузов / А. И. Галушкин.– М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.
27. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов: Справочник / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Мапошкин, М. Н. Поляк. М.: Радио и связь,– 1985. – 312 с.
28. Дежурный, И. И. Концепция развития систем сухопутной подвижной радиосвязи в Российской Федерации / И. И. Дежурный // Электросвязь. 1994. №4.– С. 21.
29. Иванов, А. А. Концепция модернизация сети общего пользования / А. А. Иванов, О. И. Фаерберг, К. Ю. Никашев //Электросвязь. - 2008. - №8.– С. 18-23.
30. Коротаев, Г. А. Методы линейного предсказания / Г. А. Коротаев // Зарубежная Радиоэлектроника. 1980. – С. 10-17.
31. Лившиц, М. З. Широкополосный CELP - кодер с мультиполосным возбуждением и многоуровневым векторным квантованием по кодовой книге с реконфигурируемой структурой / М. З. Лившиц, М. Парфенюк, А. А. Петровский // Цифровая обработка сигналов. -2005. -№2. -С. 20-35.
32. Литвинцева, А.В. Использование линейного предсказателя речи в программной модели низкоскоростного вокодера для передачи речи по гидроакустическому каналу связи / А. В. Литвинцева, М. А. Оболонин // Современные проблемы науки и образования. -2013. -№3. -С. 58-64.
33. Максимов, М.И. Проектирование низкоскоростных речепреобразующих устройств для каналов с высоким процентом ошибок / М. И. Максимов, Н. А. Сидорова, О. В. Чернорыков //Электросвязь. -2008. – №7. -С. 48-50.

34. Меккель, А. М. Влияние переходов «аналог-цифра» и «цифра-аналог» при построении сетей на основе перспективных технологий / А. М. Меккель // Электросвязь. - 2008. - №6. - С. 41-48.

35. Нейман, В. И. Интернет-телефония и перспективы ее развития / В. И. Нейман, Д. А. Селезнев // Электросвязь. - 2008. - С. 6-9.

36. Поляков, А. Н. Об одном из способов решения задачи определения оптимальных управляющих параметров системы низкоскоростной компрессии речевой информации / А. Н. Поляков // Телекоммуникации. - 2008. - №3. - С. 18.

37. Попов, О. Б. Цифровая обработка сигналов в трактах звукового вещания: учеб. пособие для вузов / О. Б. Попов, С. Г. Рихтер. - М., 2007. - С. 341.

38. Рабинер, Л. Р. Цифровая обработка речевых сигналов / Л. Р. Рабинер, Р. В. Шафер ; Пер. с англ. под ред. М. В. Назарова, Ю. Н. Прохорова. - М.: Радио и связь, 1981. - С. 496.

39. Радзишевский, А. Ю. Основы аналогового и цифрового звука / А. Ю. Радзишевский. - М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. - С. 105-109.

40. Сапожков, М. А. Вокодерная связь / М. А. Сапожков, В. Г. Михайлов. - М.: Радио и связь, 1983. - С. 248.

41. Соболев, В. Н. Выделение основного тона методом гребенчатой фильтрации / В. Н. Соболев // Автоматическое распознавание слуховых образов АРСО-12: тез. докл. и сообщений 12-го Всесоюз. семинара. Киев-Одесса, 1982. - С. 141-143.

42. Украинцев, Ю. Д. История связи и перспективы развития телекоммуникаций: учеб. пособие / Ю. Д. Украинцев, М. А. Цветов. УлГТУ, 2009. - 128 с.

43. Шелухин, О. И. Цифровая обработка и передача речи / О. И. Шелухин, Н. Ф. Лукьянцев. - М.: Радио и связь, 2000. - С. 102-106.

Воронежский государственный технический университет

REVIEW OF METHODS AND ALGORITHMS OF SPEECH INFORMATION COMPRESSION IN DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

S. L. Podvalny¹, A. D. Roshupkin²

¹Ph.D, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: spodvalny@yandex.ru

²Graduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,
e-mail: andrey.roshupkin@bk.ru

This article reviews the existing methods and algorithms for compressing voice information. The article reveals the urgency and necessity of developing the means of information exchange. It is shown that voice messages are the most natural and convenient way of information exchange. Hence, the author suggests that increasing the efficiency of voice communication via radio communication contributes to the development of the information exchange in human society, which in its turn is the crucial factor in the development of the defense, intellectual and economic potential of the state and society as a whole. The article examines in detail the main directions of speech coding development. Methods of encoding a waveform and algorithms for coding a signal source are reviewed alongside. The main types of vocoders are listed and analyzed, their classification is introduced, the main characteristics and fields of application are described. The main task of speech compression algorithms is formulated, their practical efficiency is shown using the example of a digital radio station, which manages a data transmission channel. The article emphasizes the urgency of the development of new highly effective compression algorithms that open up perspectives for the development of digital radio communication facilities

Key words: speech signal, coding, decoding, codec, compression, vocoder

References

1. Atal B. S., Acoust J., "Speech Analysis and Synthesis by Linear Prediction of the Speech Wave," Soc. Am. 65 (1990): 47.
2. Atal B. S., Remde J. R., "Efficient vector quantization of LPC parameters at 24 bits," International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing 6 -2 (1993): 13.
3. Barnwell T., Unno T., Truong K., "An Improved Mixed Excitation Linear Prediction (MELP) Coder," Proc. of ICASSP 99 (1999): 245-248.
4. Deller J. R., Proakis J. G., Hansen J. H. L., "Discrete-Time Processing of Speech Signals" Macmillan Publishing Company, (1993): 167.
5. Fant G. C., "Acoustic Theory of Speech Production," Mouton and Co.,s - Gravenhage, (1990): 81.
6. Flanagan J. L., "Source-System Interactions in the Vocal Tract," Annual - New York Academy of Science 155 (1998): 9-15.
7. Hauenstein M., Goertz N., "On the application of a psychoacoustically motivated speech-quality measure in CELP speech-coding," European Signal Processing Conference, 9 (1998): 1421-1424.
8. Markel J. D., "Formant Trajectory Estimation from a Linear Least-Squares Inverse Filter Formulation," Communications Research Laboratory, Santa Barbara, California 3 (1991): 248.
9. Moon T. K., Stirling W. C., "Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing," Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ., (2000): 127.
10. McCree A. V., Supplee L. M., Cohn R. P., Collure J. S., "MELP: The New Federal Standard at 2400 bp," International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (1997): 21-49.
11. McCree A. V., Truong K., George E. and others, "A 2.4 kbit/s MELP Coder Candidate for the New U. S. Federal Standard," International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, (1996): 200-203.
12. Rabiner L. R., Juang B. H., "Fundamentals of Speech Recognition," Prentice-Hall International, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 5 (1993): 384-407.
13. Rose R. C., Barnwell T. P., "Design and Performance of an Analysis-by-Synthesis Class of Predictive Speech Coders," International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 38 (1990): 9- 93.

14. Tuan V. N., d'Alessandro C., "Robust Glottal Closure Detection Using the Wavelet Transform," European Conference on Speech Communication and Technology, Budapest, Hungary, (1999): 2805-2808.
15. Wang C., Seneff S., "Robust Pitch Tracking for Prosodic Modeling in Telephone Speech," International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 3 (2000): 1343-1346.
16. Yang W., "Enhanced Modified Bark Spectral Distortion (EMDSD): An Objective Speech Quality Measure Based On Audible Distortion And Cognition Model," Dissertation of the Requirement for the Degree Doctor of Philosophy, (1999): 207.
17. Yeldener S. A., "4 kb/s Toll Quality Harmonic Excitation Linear Predictive Speech Coder," International Conference on Spoken Language Processing, (1996): 481-484.
18. Ying G. S., Jamieson L. H., Michell C. D., "A Probabilistic Approach to AMDF Pitch Detection," International Conference on Spoken Language Processing, (1996): 1201-1204.
19. Andreev I. V., Babkin V. V., Znamerovskij A. E., "Implementation of multichannel speech CELP codecs on DSP TMS320" ("Realizaciya mnogokanal'nyh rechevyh CELP kodekov na DSP TMS320") Second International Conference Digital Signal Processing and its Applications, (1999): 283-287.
20. Andreev I. V., Babkin V. V., Kondroutskij A. V., Zaborovskij A. V., Znamerovskij A. E., DSP "Units for IP-Telephony Systems" ("DSP dlya sistem IP-telefonii"), Third European Conference Research in the field of the DSP, (2000): 85-89.
21. Babkin V. V., "LPC vocoder 1000-1200 bit/sec" ("LPC vokoder 1000-1200 bit/s"), Third International Conference Digital Signal Processing and its Applications, (2000): 8.
22. Babkin V. V., "Comparison of noise immunity of different algorithms for estimating the pitch period of speech" ("Sravnenie pomekhoustojchivosti razlichnyh algoritmov ocenki perioda osnovnogo tona rechi") 54-th Scientific and Technical Conference (2001): 98.
23. Babkin V. V., "The architecture of the signal processing module of the two-channel IP-telephony gateway" ("Arhitektura modulya obrabotki signalov dvuhkanal'nogo shlyuza IR-telefonii"), Second International Scientific and Technical conference (2000): 75.
24. Babkin V. V., "Realizaciya dvuhkorostnogo CELP vokodera na cifrovom signal'nom processore ADSP-2181 [Implementation of a two-speed CELP vocoder on the digital signal processor ADSP-2181]," 52-nd Scientific and Technical Conference (1999): 37.
25. Bykov S. V., Zhuravlev V. I., SHalimov I. A., "Cifrovaya telefoniya: Ucheb. posobie dlya vuzov [Digital telephony: Proc. Manual for high schools]," Radio and Communication (2003): 66-72.
26. Galushkin A. I., "The theory of neural networks" ("Teoriya nejronnyh setej"), Educational. Manual for High Schools (2000): 416.
27. Gol'denberg L. M., Maposhkin B. D., Polyak M. N., "Handbook on Digital Signal Processing" ("Cifrovaya obrabotka signalov"), Radio and Communication (1985): 312.
28. Dezhurnyj I. I., "The concept of development of terrestrial mobile radio systems in the Russian Federation" ("Konceptiya razvitiya sistem suhoputnoj podvizhnoj radiosvyazi v Rossijskoj Federacii"), Telecommunications (1994): 21.
29. Ivanov A. A., Faerberg O. I., Nikashev K. YU., "The concept of modernizing the public network" ("Konceptiya modernizaciya seti obshchego pol'zovaniya"), Telecommunications 8 (2008): 18-32.
30. Korotaev G. A., "Methods of linear prediction" ("Metody linejnogo predskazaniya"), Foreign Radioelectronics (1980): 10-17.
31. Livshic M. Z., Parfenyuk M., Petrovskij A. A., "Broadband CELP encoder with multiband excitation and multilevel vector quantization with a codebook with a reconfigurable structure" ("Shirokopolosnyj CELP - koder s mul'tipolosnym vozbuzhdeniem i mnogourovnevnyim vektornym kvantovaniem po kodovoj knige s rekonfiguriruemoj strukturoj"), Digital Signal Processing 2 (2005): 20-35.
32. Litvinceva A. V., Obolonin M. A., "Using a linear predictor of speech in the software model of a low-speed vocoder for voice transmission over a hydroacoustic communication channel" ("Ispol'zovanie linejnogo predskazatelya rechi v programmnoj modeli nizkoskorostnogo vokodera dlya peredachi rechi po gidroakusticheskomu kanalu svyazi"), Modern Problems of Science and Education, 3 (2013): 58-64.
33. Maksimov M. I., Sidorova N. A., CHernoyarov O. V., "Designing low-speed speech-converting devices for channels with a high percentage of errors" ("Proektirovanie nizkoskorostnyh rechepreobrazuyushchih ustroystv dlya kanalov s vysokim procentom oshibok"), Telecommunications 7 (2008): 48-50.
34. Mekkel' A. M., "The impact of "analog-digital" and "digital-analog" transitions in building networks based on advanced technologies" ("Vliyanie perekhodov «analog-cifra i «cifra-analog» pri postroenii setej na osnove perspektivnyh tekhnologij"), Telecommunications 6 (2008): 41-48.
35. Nejman V. I., Seleznev D. A., "Internet telephony and prospects for its development" ("Internet-telefoniya i perspektivy ee razvitiya"), Telecommunications (2008): 6-9.
36. Polyakov A. N., "On one of the ways to solve the problem of determining the optimal control parameters of a system of low-speed compression of speech information" ("Ob odnom iz sposobov resheniya zadachi opredeleniya optimal'nyh upravlyayushchih parametrov sistemy nizkoskorostnoj kompressii rechevoj informacii"), Telecommunications (2008): 18.
37. Popov O. B., Rihter S. G., "Digital processing of signals in the paths of audio broadcasting" ("Cifrovaya obrabotka signalov v traktah zvukovogo veshchaniya"), Textbook for High Schools (2007): 341.
38. Rabiner L. R., Shafer R. V., "Digital Processing of Speech Signals" ("Cifrovaya Obrabotka Rechevyh Signalov"), Radio and Communication, (1981): 496.
39. Radzishevskij A. Y., "Basics of analog and digital sound" ("Osnovy analogovogo i cifrovogo zvuka"), "Viliams" Publishing House (2006): 105-109.
40. Sapozhkov M. A., Mihajlov V. G., "Vocoder Radio" ("Vokodernaya svyaz"), Radio and Communication (1983): 248.
41. Sobolev V. N., "The selection of the main tone by comb filtering" ("Vydelenie osnovnogo tona metodom grebenchatoj fil'tracii"), 12-th All-Union Seminar Automatic Recognition of Auditory Images (1982): 141-143.
42. Ukrainev Y. D., Cvetov M. A., "The history of communication and the prospects for the development of telecommunications" ("Istoriya svyazi i perspektivy razvitiya telekommunikacij"), Textbook for high schools (2009): 128.
43. Sheluhin O. I., Luk'yancev N. F., "Digital processing and voice transmission" ("Cifrovaya obrabotka i peredacha rechi"), Radio and Communication, (2000): 102-106.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ АЛГОРИТМАМИ НЕПРЕРЫВНЫХ ДРОБЕЙ

М.А. Новосельцева, Т.А. Хорошева, С.Г. Гутова

Задача цифрового моделирования стационарных случайных процессов, воздействующих на объект исследования, нередко возникает при проектировании технических систем. Для решения таких задач разрабатываются различные алгоритмы моделирования. При этом основным требованием к алгоритмам является возможность их реализации средствами современных ЭВМ. В статье описывается алгоритм цифрового моделирования стационарных случайных процессов с заданной корреляционной функцией, основанный на аппарате теории непрерывных дробей и реализующий модифицированный метод В. Висковатова. Алгоритм позволяет получить цифровую модель стационарного случайного процесса в форме конечно-разностного уравнения и осуществить оценку точности моделирования с помощью двух критериев. Данный алгоритм реализован в автоматизированной информационной системе (АИС) «Цифровое моделирование случайных процессов», которая осуществляет моделирование стационарных случайных процессов, воздействующих на объект исследования. Пример работы АИС, представленный в данной статье, иллюстрирует основные возможности моделирования и оценки полученной модели, а также пошагово иллюстрирует работу алгоритма. Представленная АИС реализована в среде программирования со свободной лицензией и является кроссплатформенной, что дает возможность использования АИС для широкого круга исследователей и позволит в будущем расширить ее возможности.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, случайный процесс, корреляционная функция, непрерывная дробь

Введение

В различных сферах науки и промышленности возникает необходимость исследования сложных объектов. Аналитическое решение данной задачи может быть невозможным или нерезультативным из-за чрезмерной трудоемкости или неустойчивости алгоритмов, а натурные эксперименты требуют значительных материальных затрат. Кроме того, большинство технических систем, в том числе вычислительные системы и сети, описываются в терминах дискретных случайных процессов. Если объект находится под воздействием случайных факторов, и, как следствие, случайных воздействий, то решение данных задач еще больше усложняется. Одним из методов, позволяющим решить вышеуказанные проблемы, является разработка и использование автоматизированных информационных систем для моделирования сложных объектов.

Постановка задачи

Случайный характер процессов, протекающих в подавляющем большинстве реальных систем (например, процессы обработки и передачи данных в компьютерных сетях) обуславливает широкое применение цифровых стохастических моделей для описания этих систем. В работе разрабатывается автоматизированная информационная система (АИС) для цифрового (дискретного) моделирования стационарных случайных процессов, воздействующих на объект исследования. Построение цифровой модели случайного процесса в АИС будет осуществляться с помощью

нетрадиционного алгоритмического аппарата – теории непрерывных дробей [2]. Данный алгоритм моделирования достаточно прост в машинной реализации и не требует больших затрат ресурсов ЭВМ и времени в процессе моделирования. Также цифровой алгоритм моделирования случайных процессов имеет преимущества по сравнению с существующими методами, недостатки которых подробно описаны в [3].

Описание алгоритма цифрового моделирования

Цифровое моделирование стационарного случайного процесса $y(t)$ с заданной корреляционной функцией (КФ) $R_{yy}(\tau)$ (табл. 1) заключается в воспроизведении на ЭВМ дискретной последовательности стационарного случайного процесса $y(k\Delta t)$, где $k = 0, \dots, N$; Δt – шаг дискретизации [3, 4]. Данная задача цифрового моделирования обычно сводится к генерации белого шума $x(k\Delta t)$ с необходимым математическим ожиданием и дисперсией (m_x , D_x) и подаче его на вход формирующего фильтра с непрерывной передаточной функцией (НПФ) $G(s)$ (рис. 1) [3, 4].

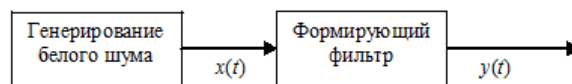


Рис. 1. Структурная схема моделирования стационарного случайного процесса

Структура и параметры фильтра определяются на основе заданной корреляционной функции и модифицированного алгоритма В. Висковатова, в основе которого лежит использование непрерывных дробей [2]. В работе реализовано моделирование стационарных случайных процессов со следующими типовыми корреляционными функциями (табл. 1) [4].

При выборе необходимой корреляционной функции осуществляется следующая последовательность действий.

Новосельцева Марина Александровна - КемГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: man300674@gmail.com
 Хорошева Татьяна Александровна - КемГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: tkhorosheva@yandex.ru
 Гутова Светлана Геннадьевна – КемГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: gsg1967@mail.ru

1. Определение НПФ формирующего фильтра $G(s)$, ее нулей и полюсов (табл.1).

2. Нахождение весовой функции $h(t)$ формирующего фильтра с помощью обратного преобразования Лапласа функции $G(s)$.

3. Оценка интервала корреляции моделируемого процесса. Его определяют как значение аргумента нормированной корреляционной функции вида:

$$r_{yy}(\tau) = R_{yy}(\tau) / R_{yy}(0),$$

начиная с которого выполняется соотношение:

$$|r_{yy}(\tau)| \leq 0,05, \text{ для всех } \tau \geq \tau_{\text{кор}}.$$

4. Задание шага дискретизации Δt , удовлетворяющего условию SP-идентифицируемости [3] и неравенству вида:

$$\Delta t_{\text{кр}} < \Delta t < \tau_{\text{кор}},$$

где $\tau_{\text{кор}}$ – интервал корреляции процесса.

Таблица 1

Типовые корреляционные функции и НПФ формирующих фильтров

№	Корреляционная функция $R_{yy}(\tau)$	НПФ формирующих фильтров $G(s)$
1	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }$	$\frac{\sigma\sqrt{2\alpha}}{s+\alpha}$
2	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(1+\alpha \tau)$	$\frac{2\sigma\sqrt{\alpha^3}}{(s+\alpha)^2}$
3	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(1-\alpha \tau)$	$\frac{2\sigma\sqrt{\alpha}s}{(s+\alpha)^2}$
4	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(1+\alpha \tau +\frac{\alpha^2\tau^2}{3})$	$\frac{4\sigma\sqrt{\alpha^5}}{\sqrt{3}(s+\alpha)^3}$
5	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau } \cos \omega_0 \tau$	$\frac{\sigma\sqrt{2\alpha}(s+\sqrt{\alpha^2+\omega_0^2})}{s^2+2\alpha s+\alpha^2+\omega_0^2}$
6	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(\cos \omega_0 \tau + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau)$	$\frac{2\sigma\sqrt{\alpha}\sqrt{\alpha^2+\omega_0^2}}{s^2+2\alpha s+\alpha^2+\omega_0^2}$
7	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(\cos \omega_0 \tau - \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 \tau)$	$\frac{2\sigma\sqrt{\alpha}s}{s^2+2\alpha s+\alpha^2+\omega_0^2}$
8	$\sigma^2 e^{-\alpha \tau }(\cos \omega_0 \tau + C \sin \omega_0 \tau)$	$\frac{\sigma\sqrt{2(\alpha-C\omega_0)}(s+s^H)}{s^2+2\alpha s+\alpha^2+\omega_0^2}$ $s^H = \sqrt{\frac{(\alpha+C\omega_0)(\alpha^2+\omega_0^2)}{\alpha-C\omega_0}}$

5. Расчет идентифицирующей матрицы В. Висковатова, имеющей вид:

$$\begin{matrix} -1 \text{ - строка} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \end{pmatrix} \\ 0 \text{ - строка} & \begin{pmatrix} h(0) & h(\Delta t) & h(2\Delta t) & \dots & h(n\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ 1 \text{ строка} & \begin{pmatrix} \alpha_1(0) & \alpha_1(\Delta t) & \alpha_1(2\Delta t) & \dots & \alpha_1(n\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \dots & \begin{pmatrix} \alpha_2(0) & \alpha_2(\Delta t) & \alpha_2(2\Delta t) & \dots & \alpha_2(n\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \dots & \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \\ m \text{ строка} & \begin{pmatrix} \alpha_m(0) & \alpha_m(\Delta t) & \alpha_m(2\Delta t) & \dots & \alpha_m(n\Delta t) & \dots \end{pmatrix} \\ \dots & \begin{pmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \end{matrix},$$

в которой (-1) -строка – значения импульсной функции [5], (0) -строка содержит значения весовой функции $h(n\Delta t)$. Остальные элементы матрицы рассчитываются с помощью соотношения вида:

$$\alpha_m(n\Delta t) = \frac{\alpha_{m-2}((n+1)\Delta t)}{\alpha_{m-2}(0)} - \frac{\alpha_{m-1}((n+1)\Delta t)}{\alpha_{m-1}(0)},$$

где $\alpha_{-1}(n\Delta t) = \delta(n\Delta t)$; $\alpha_0(n\Delta t) = h(n\Delta t)$; $m = 1, 2, 3, \dots$, а $n = 0, 1, 2, \dots$. Первый столбец идентифицирующей матрицы позволяет получить правильную С-дробь [2], свернув которую, получают ДПФ формирующего фильтра:

$$G(z, \Delta t) = \frac{h(0)}{1 + \frac{\alpha_1(0)z^{-1}}{1 + \frac{\alpha_2(0)z^{-1}}{1 + \dots}}}$$

От выражения для ДПФ переходят к дискретной модели случайного процесса вида в форме конечно-разностного уравнения:

$$y(k\Delta t) = \sum_{i=0}^m a_i x((k-i)\Delta t) - \sum_{i=1}^n b_i y((k-i)\Delta t) \quad (*)$$

В табл. 2 приводятся номера нулевых строк идентифицирующей матрицы и вид конечно-разностных уравнений (*) для каждой типовой корреляционной функции.

Таблица 2

Конечно-разностные уравнения случайных процессов для типовых корреляционных функций (КФ)

№ КФ	№ нулевой строки, конечно-разностное уравнение стационарного случайного процесса
1	2-ая, $y(k) = a_1 x(k) - b_1 y(k-1)$
2	4-ая, $y(k) = a_1 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$
3	4-ая $y(k) = a_1 x(k) + a_2 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$
4	6-ая, $y(k) = a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + a_3 x(k-3) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2) - b_3 y(k-3)$
5	4-ая, $y(k) = a_1 x(k) + a_2 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$
6	4-ая, $y(k) = a_1 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$

Продолжение табл. 2

7	4-ая, $y(k) = a_1 x(k) + a_2 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$
8	4-ая, $y(k) = a_1 x(k) + a_2 x(k-1) - b_1 y(k-1) - b_2 y(k-2)$

6. Нахождение нулей и полюсов $G(z, \Delta t)$, а также определение соответствующих им нулей и полюсов в s -плоскости. Сравнение полученных результатов с истинными нулями и полюсами НПФ формирующего фильтра $G(s)$, полученными в п. 1 (1-й критерий определения точности моделирования).

7. Расчет дисперсии D_x входного белого шума (табл. 3) и генерация псевдослучайных отсчетов белого шума $x(k\Delta t)$.

Таблица 3

Дисперсия белого шума

№ КФ	Дисперсия D_x белого шума
1	$(\sigma^2 - b_1^2 \sigma^2) / a_1^2$
2	$(\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)) / a_1^2$
3	$\frac{\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 b_1}$
4	$\frac{(\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2 - b_3^2) - 2R_{yy}(\Delta t)(b_1 b_2 + b_3 b_2) - 2b_1 b_3 R_{yy}(2\Delta t)) / (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 - 2a_1 a_2 b_1 - 2a_3 a_2 b_1 + 2a_1 a_3 b_1^2 - 2a_3 a_1 b_2)}{a_1^2}$
5	$\frac{\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 b_1}$
6	$\frac{\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)}{a_1^2}$
7	$\frac{\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 b_1}$
8	$\frac{\sigma^2(1 - b_1^2 - b_2^2) - 2b_1 b_2 R_{yy}(\Delta t)}{a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 b_1}$

8. Моделирование стационарного случайного процесса на основе полученного конечно-разностного уравнения (*) с отсечением переходного процесса.

9. Получение модельной корреляционной функции по формуле

$$R_{yy}^M(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} y(i\Delta t)y((i+k)\Delta t).$$

10. Определение точности моделирования на основе дисперсии расхождений (2-й критерий определения точности моделирования):

$$D_e = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (e(k) - M_e)^2,$$

где $e(k) = R_{yy}^M(k\Delta t) - R_{yy}(k\Delta t)$, $M_e = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m e(k)$, m – число значений корреляционных функций.

Описание АИС

Предложенный алгоритм ориентирован на использование средств вычислительной техники и реализован в АИС «Цифровое моделирование случайных процессов». В качестве программных средств разработки использован язык программирования C++ и фреймворк Qt [1, 6]. Данный выбор обусловлен тем, что Qt имеет открытый исходный код и предоставляет возможность использовать свободно распространяемую лицензию. Открытый программный код позволит в дальнейшем расширять возможности АИС по цифровому моделированию и анализу систем. Также преимуществом использования разработанной АИС является то, что для ее работы не требуется установки дополнительного программного обеспечения. Достаточно запустить исполняемый файл из папки AIS. Взаимосвязь окон программы представлена на схеме (рис. 2).

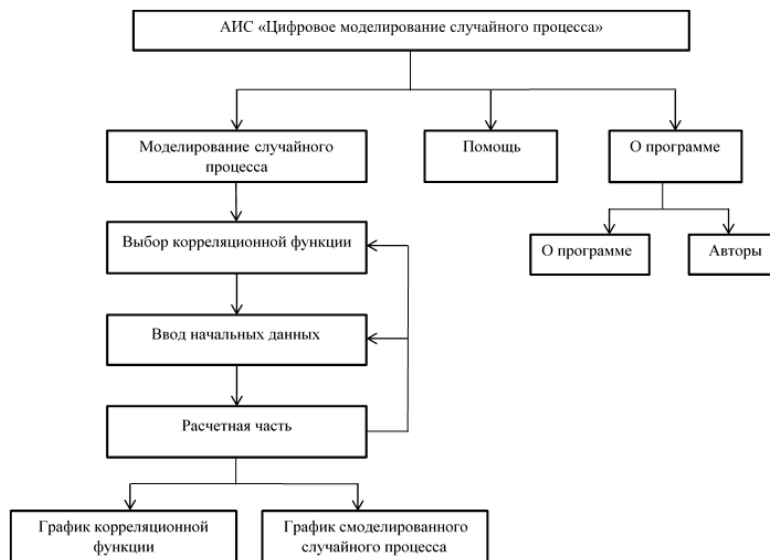


Рис. 2. Взаимосвязь окон АИС «Цифровое моделирование случайных процессов»

Рассмотрим работу АИС «Цифровое моделирование случайных процессов» на примере моделирования одного из случайных процессов. Началом работы с программой является диалоговое окно (рис. 3) выбора одной из типовых корреляционных функций, описанных в табл. 1.

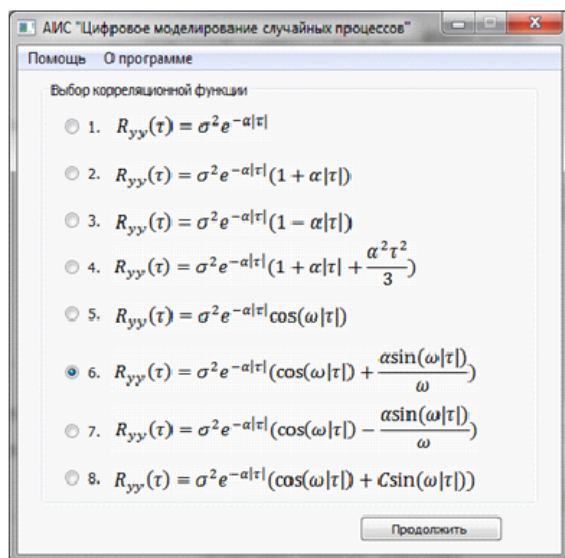


Рис. 3. Окно выбора корреляционной функции

На следующем шаге работы программы пользователю предлагается ввести начальные данные (α , σ^2 , ω , C), набор которых определяется в зависимости от выбранной функции. Если вводимые значения не удовлетворяют ограничениям, выводится сообщение об ошибке. Ошибочные данные можно исправить и продолжить расчет. На каждом из этапов работы программы пользователь может с помощью кнопки «Меню» вернуться к предыдущему диалоговому окну или к диалоговому окну выбора корреляционной функции. Расчетная часть алгоритма реализована в основном диалоговом окне (рис. 4). В окне выводится интервал корреляции случайного процесса. При выборе корреляционных функций 5, 6, 7 и 8 также

отображается условие SP-идентифицируемости [3]. Учитывая эти ограничения, пользователь вводит значение шага дискретизации Δt (рис. 4). Далее рассчитывается и выводится на экран значение первого критерия точности и конечно-разностное уравнение случайного процесса (рис. 4).

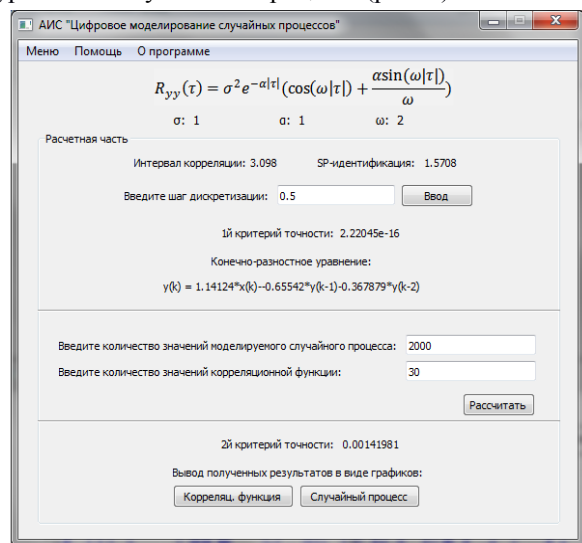


Рис. 4. Основное диалоговое окно АИС

Активируются два поля ввода: количество значений случайного процесса; количество значений корреляционной функции. Как итог расчетной части на экран выводится значение второго критерия точности и активируются две кнопки для вывода графиков полученных результатов: график смоделированного случайного процесса (рис. 5), график корреляционной функции случайного процесса (рис. 6). Результаты моделирования выводятся в режиме реального времени, а также сохраняются в формат электронной таблицы (.xls) для дальнейшей обработки и использования в других расчетах.

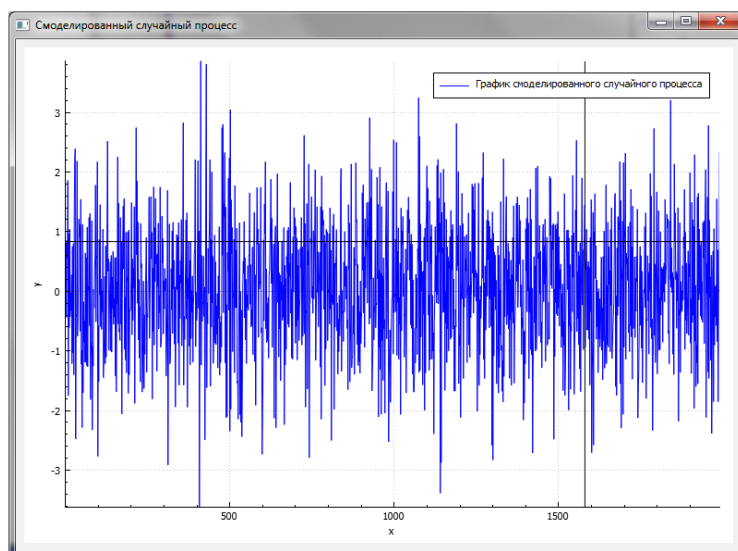


Рис. 5. График результатов моделирования случайного процесса

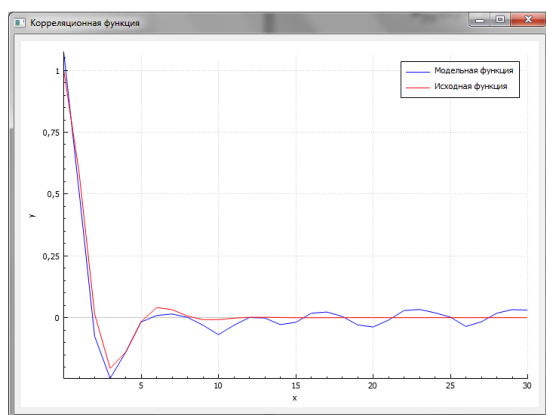


Рис. 6. График корреляционной функции случайного процесса

Заключение

Представленная в работе АИС «Цифровое моделирование случайных процессов» может быть использована при решении разнообразных задач, связанных с прикладным анализом случайных процессов; при синтезе, проектировании и исследовании цифровых систем контроля, диагностики, управления и обучения сложных

Кемеровский государственный университет

объектов, а также в учебном процессе студентами и магистрантами технических направлений.

Литература

1. Программирование на языке C++ в среде Qt Creator / Е. Р. Алексеев, Г. Г. Злобин, Д. А. Костюк, О. В. Чеснокова, А. С. Чмыхало. – М.: ALT Linux, 2015. – 448 с.
2. Карташов, В. Я. Непрерывные дроби и их приложения к задачам технической кибернетики: учеб. пособие / В. Я. Карташов, С. Г. Гутова. – Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2012. – 136 с.
3. Карташов, В. Я. Цифровое моделирование стационарных случайных процессов с заданной корреляционной функцией на основе непрерывных дробей / В. Я. Карташов, М. А. Новосельцева // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 31. – С. 49–91.
4. Прикладной анализ случайных процессов / под ред. С. А. Прохорова. – Самара : СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
5. Сиберт, У. М. Цепи, сигналы, системы / У. М. Сиберт. – М. : Мир, 1988. – Т. 1. – 510 с.
6. Qt Documentation [Электронный ресурс] : – Режим доступа : World Wide Web. URL : <http://doc.qt.io>.

AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF DIGITAL SIMULATION OF STATIONARY RANDOM PROCESSES BY ALGORITHMS OF THE CONTINUED FRACTIONS

M. A. Novoseltseva¹, T. A. Khorosheva², S. G. Gutova³

¹PhD, Associate professor, Kemerovo state university, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: man300674@gmail.com

²PhD, Associate professor, Kemerovo state university, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: tkhorosheva@yandex.ru

³PhD, Associate professor, Kemerovo state university, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: gsg1967@mail.ru

The problem of digital modeling of stationary random processes affecting the research object often arises during the designing process of technical systems. To solve such problems, various modeling algorithms are being developed. In such case, the main requirement is to implement the algorithms using modern computing systems. The article describes an algorithm for digital simulation of stationary random processes with a given correlation function, based on the theory of continued

fractions and the modified “Viskovatov’s method”. The algorithm makes it possible to obtain a digital model of a stationary random process in the form of a finite-difference equation and to estimate the accuracy of modeling using two criteria. This algorithm is implemented in the automated information system (AIS) "Digital Simulation of Random Processes", which implements the simulation of stationary random processes affecting the object of research. The AIS operation sample presented in this article illustrates the basic possibilities of modeling and evaluating the model obtained, and also illustrates the “step by step” operation of the algorithm. The presented AIS is implemented in a free license licensing environment and is cross-platform, which makes it possible to use AIS for a wide range of researchers and will allow to expand its capabilities in the future

Key words: automated information system, random process, correlation function, continued fraction

References

1. Alekseev E. R., Zlobin G. G., Kostjuk D. A., Chesnokova O. V., Chmyhalo A. S., “*Programming in language C++ in the environment of Qt Creator*” (“*Programmirovaniye na jazyke C++ v srede Qt Creator*”), ALT Linux (2015): 448.
2. Kartashov V. Ja., Gutova S. G., “*The continued fractions and their annexes to tasks of an engineering cybernetics*” (*Nepreryvnye drobi i ih prilozheniya k zadacham tehicheskoy kibernetiki*), Kemerovo State University (2012): 136.
3. Kartashov V. Ja., Novoseltceva M. A., “*Digital simulation of stationary accidental processes with the given correlative function on the basis of the continued fractions*” (*Cifrovoe modelirovaniye stacionarnykh sluchajnykh processov s zadannoj korrelyacionnoj funkciej na osnove nepreryvnykh drobej*), Control of big systems (2010): 31 - 49-91.
4. Prokhorov S. A., *Application-oriented analysis of accidental processes (Prikladnoy analiz sluchajnykh processov)*, Samara: SNTs RAS, (2007): 582
5. Sibert U. M., “*Circuits, signals, systems*” (“*Cepi, signaly, sistemy*”), “Moscow: Patterns” (1988): Vol. 1 – 510.
6. Qt Documentation [Electronic resource] <http://doc.qt.io>

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ ПО ФОРМИРОВАНИЮ БЮДЖЕТА РАЗВИТИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.Н. Кострова, Н.А. Лещева, Ю.С. Сахаров, С.О. Сорокин

В настоящее время актуальным является вопрос формирования бюджета развития образовательной организации, в частности, общеобразовательного учреждения. Первоначально формируется набор управленческих действий в общеобразовательном учреждении по каждому направлению развития. Кроме того, следует выделить ряд дополнительных условий, связанных с достижением определенного уровня теми показателями, которые имеют отрицательную динамику за некоторый период времени. Далее определяются дополнительные затраты на реализацию каждого действия из трех составляющих субсидий. Для определения значимости направлений развития на очередной финансовый год осуществляется групповое экспертное оценивание одним из методов экспертного оценивания – методом априорного ранжирования. Ранжирование осуществляется для каждой ступени обучения. Задача экспертов состоит в назначении рангов, которые бы комплексно отражали значимость рассматриваемого направления развития для выбора управленческих действий. Затем осуществляется оптимизационное моделирование, которое заключается в исследовании влияния разнообразия вариантов ограничений на рассмотрение бюджета развития между направлениями на основе мониторинговой информации

Ключевые слова: экспертное оценивание, оптимизационное моделирование, интегральный показатель, ранжирование

Введение

За последнее десятилетие образовательный мониторинг превратился в эффективный инструмент при решении управленческих задач [1]. Мониторинговая информация за отдельные календарные периоды $t = \overline{1, T}$ накапливается и формируется в виде временных рядов изменения показателей эффективности деятельности образовательных организаций по основным направлениям:

$$f_{iv}(t), \quad (1)$$

где $i = \overline{1, I}$ – номер показателя, характеризующего эффективность деятельности образовательной организации; $v = \overline{1, V}$ – номер направления деятельности.

Постановка задачи

Рассмотрим возможность использования данных (1) при формировании бюджета развития образовательной организации. В этом случае за прошедшие календарные периоды $t = \overline{1, T}$ известны объемы расходов по каждому направлению деятельности:

$$C_v(t). \quad (2)$$

Наличие данных (1), (2) позволяет построить регрессионные зависимости на основе временных рядов [2]. С этой целью необходимо произвести проверку статистических рядов на автокорреляцию, то есть на отсутствие корреляции между соседними членами ряда, сдвинутыми на Δt единиц того же ряда, по критерию Андерсона [3]. Чтобы избежать автокорреляции временного ряда, в уравнение регрессии надо ввести в качестве переменной согласно теореме Фриша и Воу время. С учетом введения времени в качестве переменной при наличии автокорреляции временных рядов модель имеет следующий вид

$$f_{iv}(t) = \varphi(C_v(t), t). \quad (3)$$

Возможность включения в модель (3) времени как одного из факторов дает возможность определять прогностическую оценку для очередного календарного периода $T+1$.

$$f_{iv}(T+1) = \varphi(C_v(t), T+1) \quad (4)$$

Задача оптимизационного моделирования заключается в распределении объема расходов между направлениями, обеспечивающего достижение целевой функции при определенных ограничениях, которые выражены зависимостями (4). Для формирования целевой функции от отдельных показателей f_i перейдем к интегральной функции F [4].

Вариационный ряд каждого показателя $f_{iv}(t)$ преобразуется с использованием выборочных статистических характеристик:

Кострова Вера Николаевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: kostrova_v@mail.ru
Лещева Наталия Алексеевна – ВИРО, ведущий науч. сотрудник, e-mail: viro-vrn@mail.ru
Сахаров Юрий Серафимович – МТУ-МГУПИ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: sakharovu@yandex.ru
Сорокин Святослав Олегович – ВИБТ, аспирант, e-mail: offica@vivt.ru

- среднего значения для календарного периода

$$\overline{f_{iv}} = m(f_{iv}(t)) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_{iv}(t);$$

- среднеквадратичного отклонения

$$\sigma(f_{iv}) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_{iv} - \overline{f_{iv}})^2}.$$

Нормировка на единичную дисперсию имеет вид

$$\hat{f}_{iv} = \frac{f_{iv}(t) - \overline{f_{iv}}}{\sigma(f_{iv})}.$$

Для ограничения диапазона изменения значений показателя в интервале от 0 до 1 использует нелинейное функциональное преобразование данных с помощью сигмовидной функции

$$\hat{f}_{iv}' = \theta\left(\frac{f_{iv} - \overline{f_{iv}}}{\sigma}\right),$$

$$\text{где } \theta(a) = \frac{1}{1 + e^{-2a}}.$$

Интегральное оценивание осуществляется с использованием аддитивной свертки с весовыми коэффициентами [5]

$$F = \sum_{v=1}^V \alpha_v \sum_{iv=1}^{I_v} \alpha_{iv} - \hat{f}_{iv}', \quad (5)$$

где $0 \leq \alpha_v \leq 1$, $\sum_{v=1}^V \alpha_v = 1$; $0 \leq \alpha_v \leq 1$, $0 \leq \alpha_{iv} \leq 1$,

$$\sum_{iv=1}^{I_v} \alpha_{iv} = 1$$

Основным ограничением в этой задаче является суммарный объем бюджета развития (С):

$$\sum_{v=1}^V C_v(T+1) \leq C. \quad (6)$$

Кроме того, следует выделить ряд дополнительных условий, связанных с достижением определенного уровня теми показателями, которые имеют отрицательную динамику за некоторый период времени t :

$$f_m = \varphi_m(C_v(t), T+1) \geq f_l^{np}, \quad (7)$$

где $m = \overline{1, M}$ - номера показателей, по которым в мониторинге в течение всех либо последних $t = \overline{1, T}$ календарных периодов по результатам мониторинга зафиксирована отрицательная динамика, f_m^{np} - прогностическая оценка m -го показателя, значение которой планируется достичь в $(T+)$ -й календарный период.

Тогда оптимизационная модель на основе (5), (6), (7) запишется следующим образом

$$\sum_{v=1}^V \alpha_v \sum_{iv=1}^{I_v} \alpha_{iv} \hat{f}_{iv}'(C_v(t), T+1) \rightarrow \max C_v(T+1),$$

$$\sum_{v=1}^V C_v(T+1) \leq C,$$

$$\varphi_m(C_v(t), T+1) \geq f_m^{np}, \quad m = \overline{1, M} \quad (8)$$

$$C_v(T+1) \geq 0, \quad v = \overline{1, V}.$$

Особенностью оптимизационной модели (8) является многовариантный характер правых частей ограничений (6), (7). Для ограничения (6) $l_1 = \overline{1, L_1}$ вариантов определяется экспертным характером балансирования доходов и расходов по каждому направлению бюджета развития. Рассмотрим конкретную ситуацию для общеобразовательного учреждения, где направлениями развития $v = \overline{1, V}$ являются:

предшкольная подготовка и маркетинг;

профильность;

здоровьесбережение;

безопасность;

инновационность;

поддержка одаренности;

результативность академических достижений;

результативность творческих достижений.

Предварительно формируется набор управленческих действий в общеобразовательном учреждении по каждому

направлению развития U_{li}^v , где l_i - номер действия по i -му интегральному показателю,

$l_i = \overline{1, L_i}$. Так по направлению профильность

набор основных действий следующий:

введение нового профиля;

введение в рамках существующего профиля новых элективных курсов, реализуемых учителями школы;

введение в рамках существующего профиля новых элективных курсов, реализуемых приглашенными преподавателями вузов.

Далее определяются дополнительные затраты на реализацию каждого действия их трех составляющих субсидий C_{lij} , где j - номер соответствующей составляющей субсидии, $j = \overline{1, 3}$.

Для определения значимости направлений развития на очередной финансовый год осуществляется групповое экспертное оценивание одним из методов экспертного

оценивания – методом априорного ранжирования [2].

В качестве экспертов выступают представители органов управления образованием, администрация школы, представители педагогического коллектива, совета школы. Ранжирование осуществляется для k -й ступени обучения ($k=1$ – начальная, $k=2$ – основная, $k=3$ – старшая). Задача экспертов состоит в назначении рангов Q_{ikl} , которые бы комплексно отражали значимость v -го ($v=1, \overline{V}$) направлений развития для выбора управленческих действий U_{li} . Полученные ранги переводятся в относительную форму:

$$b_{vkl} = 1 - \frac{Q_{ikl}}{\sum_{i=1}^I Q_{ikl}}.$$

Величины b_{ikl} представляют собой нормированные коэффициенты значимости направлений развития.

Полученные предварительные данные b_{vkl} , C_{lij} используются для построения оптимизационной модели компромиссного выбора [6].

Для ограничений (7) число $l_2 = \overline{1, L_2}$ вариантов связано с групповым экспертным выбором [6] f_m^{np} по тенденции изменения временного ряда

$$\Delta f_m = f_m(t+1) - f_m(t), \quad m = \overline{1, M}.$$

Ответы экспертов рассматриваются как режим голосования по l_2 i-й альтернативы для набора показателей $m = \overline{1, M}$. Окончательное решение экспертного оценивания формируется на основе правила большинства.

Оптимизационное моделирование заключается в исследовании влияния разнообразия вариантов ограничений на рассмотрение бюджета развития между направлениями. С этой целью перейдем от модели (8) к эквивалентной задаче

$$\sum_{v=1}^V \alpha_v \sum_{i=1}^{I_v} \alpha_{iv} \hat{f}_{iv}(C_v(t), T+1) + y_1 \left(C_{l_1} - \sum_{v=1}^V C_v(T+1) \right) \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M y_m (\varphi_m(C_v(t), T+1) - f_{ml_2}) \rightarrow \max_{C_v} \min_y,$$

где $y_1, y_m, m = \overline{1, M}$ – коэффициенты эквивалентной задачи оптимизации.

Возможность учета многовариантности достигается переходом от задачи (9) к двойственной и представлением возможности числа вариантов в двоичном исчислении

$$l_1 = x_1 + 2x_2 + 4x_3, \quad (10)$$

$$l_2 = x_4 + 2x_5 + 4x_6,$$

$$\text{где } x_1 \div x_6 = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases}$$

Решая двойственную к (9) задачу оптимизации для разных вариантов $l_1 = \overline{1, L_1}$, $l_2 = \overline{1, L_2}$, получаем набор оптимальных значений коэффициентов $y_1^*, y_m^*, m = \overline{1, M}$ в зависимости от значений альтернативных переменных x_1, x_6 :

$$y_1^* = \Psi_1(x_1, x_2, x_3),$$

$$y_m^* = \Psi_m(x_4, x_5, x_6)$$

Тогда эквивалентная задача (9) преобразуется к следующей задаче с альтернативными переменными (10) и переменными $C_v(T+1)$

$$\begin{aligned} & \sum_{v=1}^V \alpha_v \sum_{i=1}^{I_v} \alpha_{iv} \hat{f}_{iv}(C_v(t), T+1) + y_1^*(x_1, x_2, x_3)^* \\ & * (C_{l_1} - \sum_{v=1}^V C_v(T+1)) + \sum_{m=1}^M y_m^*(x_4, x_5, x_6)^* \\ & * (y_m(C_v(t), T+1) - f_{ml_2}) \rightarrow \max_{x_1, x_6, C_v(T+1)} \quad (11) \end{aligned}$$

Для решения задачи (11) используется совмещение рандомизированного поиска по непрерывным переменным $C_v(T+1)$ и альтернативным переменным x_1, x_6 [6], а определение y^* осуществляется по следующему итерационному алгоритму

$$\begin{aligned} y_1^{k+1} &= \max \left\{ 0, y_1^k - \gamma_1^{k+1} \left(C_{l_1} - \sum_{v=1}^V C_v(T+1) \right) \right\}, \\ y_m^{k+1} &= \max \left\{ 0, y_m^k - \gamma_m^{k+1} (\varphi_m(C_v(t), T+1) - f_{ml_2}) \right\}, \end{aligned}$$

где k – номер итерации, $k=1, 2, \dots$

Структурная схема оптимизационного моделирования приведена на рисунке.



Структурная схема оптимизационного моделирования бюджета развития образовательной организации на основе мониторинговой информации

Литература

1. Зернов В.А. Критерии мониторинга как эффективный инструмент повышения конкурентоспособности отечественного образования / В.А. Зернов // Высшее образование. – 2013. - № 7. – С. 6-10.
2. Фролов В.Н. Принципы идентификации и управления объектами с неоднородными характеристиками / В.Н. Фролов, Я.Е. Львович. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2010. – 159 с.
3. Тинтнер Г. Введение в эконометрику/ Г. Тинтнер. - М.: Статистика, 1965. – 361 с.
4. Зернов В.А. Оптимизация развития негосударственного сектора высшего образования на основе результатов мониторинго-рейтингового оценивания / В.А. Зернов, Я.Е. Львович, С.О. Сорокин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. – 2014. - № 4. – С. 22-26
5. Львович И.Я. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и

Воронежский государственный технический университет
Воронежский институт развития образования
Московский технологический университет – Московский государственный университет
приборостроения и информатики
Воронежский институт высоких технологий

OPTIMIZATION MODELING IN DECISION-MAKING PROCESS IN BUDGETING OF THE EDUCATIONAL ORGANIZATION DEVELOPMENT ON THE BASIS OF MONITORING INFORMATION

V.N. Kostrova¹, N.A. Leshcheva², Y.S. Sakharov³, S.O. Sorokin⁴

¹Ph.D., Full Professor, Voronezh, Russian Federation

e-mail: kostrova_v@mail.ru

²Assistant Professor, Voronezh institute of education development, Voronezh, Russian Federation

e-mail: viro-vrn@mail.ru

³Ph.D., Full Professor, Moscow Technological Institute - Moscow State University of Instrument Engineering and
Computer Science, Moscow, Russian Federation

e-mail: sakharovu@yandex.ru

⁴Graduate student, Voronezh institute of high technologies, Voronezh, Russian Federation

e-mail: office@vivt.ru

Currently, the issue of forming the budget for the development of an educational organization, in particular, a general educational institution, is crucial. Initially, a set of managerial activities needs to be formed within the education institution for each development direction. In addition, it is necessary to identify a number of additional conditions related to the achievement of a certain level by those indicators that have negative dynamics over a certain period of time. Further, additional costs are determined for the implementation of each action of their three component investments. To determine the significance of the directions of development for the next financial year, joint expert evaluation is carried out using one of the methods of expert evaluation - the method of a "priori ranking". The ranking is carried out for each level of training. The task of the experts is to designate ranks that would reflect the significance of the development direction in a comprehensive way to choose the correct management strategies. Then, optimization modeling is implemented. It consists in investigating the influence of a variety of constraint options on the budget development review based on monitoring information received

Key words: expert estimation, optimization modeling, integral index, ranking

References

1. Zernov V.A. "The criteria for monitoring as an effective tool for enhancing the competitiveness of domestic education" ("Kriterii monitoringa kak effektivnii instrument povisheniya konkurentosposobnosti otechestvennogo obrazovaniya") Kriterii ocenki 7 (2013): 6-10.
2. Frolov V.N., Lvovich Y.E. "Principles of object identification and management with heterogeneous characteristics" ("Principi identifikacii i upravleniya obektami s neodnorodnimi xarakteristikami"), Voronezh: CPI "Scientific Book (2010): 159.
3. Tintner G. "Introduction to Econometrics" ("Vvedenie v ekonometriku") (1965): 361.
4. Zernov V.A., Lvovich Y.E., Sorokin S.O., "Optimizing the development of the private higher education sector on the basis of the results of monitoring and evaluation of the rating" ("Optimizaciya razvitiya negosudarstvennogo sektora vsshego obrazovaniya na osnove rezultatov monitoringo-reitingovogo ocenibaniya"), Bulletin of Voronezh State University. Series: Issues of Higher Education 4 (2014): 22-26.
5. Lvovich I.Y., Frolov V.N., "Information Technology Simulation and Optimization: A Brief Theory and Applications" ("Informacionnie texnologii modelirovaniya i optimizacii: kratkaya teoriya i prilozheniya"), Voronezh: CPI "Scientific Book" (2016): 444.
6. Lvovich I.Y., Lvovich Y.E. "Decision-making in the expert-virtual environment" ("Prinyatie reshenii v ekspertno-virtualnoi srede"), Voronezh: CPI "Scientific Book (2010): 140.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА СИГНАЛОВ

Д.Н. Донских, С.А. Попов, А.В. Юрьев, В.Ф. Барабанов, С.В. Тюрин

В статье предложена структурная схема синтезатора сигналов произвольной формы, состоящая из управляющего модуля и модуля формирования сигналов. Основными компонентами управляющего модуля являются постоянное запоминающее устройство, в качестве которого была использована микросхема NAND Flash памяти, и процессор фирмы ST Microelectronics STM32F439. Процессор STM32F439 используется для управления модулем формирования сигналов, а также для организации работы сетевого интерфейса. Модуль формирования сигналов построен с использованием программируемой логической интегральной схемы XC7K70T фирмы Xilinx, модуля памяти DDR3, цифро-аналогового преобразователя AD9739 фирмы Analog Devices и полосового фильтра.

Значительное внимание уделено описанию программного обеспечения синтезатора сигналов. Предложен один из возможных вариантов реализации программного обеспечения для модуля формирования сигналов, которое представляет собой конечный автомат, обеспечивающий взаимодействие с цифро-аналоговым преобразователем и возможность использования модуля памяти SDRAM DDR3 в качестве оперативного запоминающего устройства для хранения отсчетов формируемого сигнала. Также представлен возможный подход к разработке программного обеспечения управляющего модуля синтезатора сигналов, основной задачей которого является организация хранения формируемых сигналов в памяти и обслуживание сетевого интерфейса

Ключевые слова: цифровой синтез сигналов, формирование сигналов, ПЛИС, Verilog HDL

Введение

Синтезаторы сигналов произвольной формы находят широкое применение в таких областях науки и техники как связь, радиолокация, навигация, цифровое телевидение и многих других.

Одним из методов построения синтезаторов сигналов произвольной формы является так называемый метод прямого цифрового синтеза (DDS - Direct Digital Synthesis). В данном методе используется аккумулятор фазы (в качестве которого обычно выступает двоичный счетчик), значение которого на каждом такте опорной частоты увеличивается на некоторую величину, определяемую значением регистра приращения фазы. Затем, с помощью специальной таблицы зависимости амплитуды формируемого сигнала (например, синусоидального) от фазы рассчитывается текущее значение амплитуды и передается на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), а результат преобразования затем фильтруется полосовым фильтром [1].

Прямой цифровой синтез позволяет генерировать сигналы различной формы со свойственной цифровым системам точностью. К основным преимуществам данного метода можно отнести высокое разрешение по частоте и фазе, быстрый переход на другую частоту и фазу, а

также возможность перестройки частоты без разрыва фазы [4].

Данный метод широко применяется при построении измерительной техники [2], обучающих платформ [3], QPSK модуляторов [5,6], в радиолокации для формирования зондирующих линейно частотно модулированных сигналов [1,7] и во множестве других областей.

Также известен метод, при котором отсчеты формируемого сигнала рассчитываются заранее, а для их хранения используется постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) [1].

В данном методе используется указатель адреса, значение которого на каждом такте опорной частоты увеличивается на единицу. Далее, по полученному адресу из ПЗУ считывается текущее значение амплитуды сигнала, которое передается на ЦАП. Результат преобразования, затем фильтруется полосовым фильтром.

Цель данной работы - рассмотреть один из возможных подходов к разработке программного обеспечения для цифровых синтезаторов сигналов данного типа.

Структурная схема синтезатора сигналов

Структурная схема и внешний вид синтезатора сигналов представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Цифрой 1 на рисунке обозначен микроконтроллер STM32F439. Данный микроконтроллер является основой управляющего модуля и используется для управления и организации взаимодействия между всеми другими модулями формирователя, а также для взаимодействия с пользователем посредством интерфейса Ethernet. STM32F439 основан на 32-х битном ARM ядре Cortex-M4, имеет 256 Кбайт ОЗУ, 2 Мб ПЗУ и работает на частоте 180 МГц [11].

Донских Дмитрий Николаевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: dndonskih@gmail.com

Попов Сергей Александрович – ВГТУ, аспирант, e-mail: sergey.a.popov@yandex.ru

Юрьев Александр Васильевич – ЦСир НТЦ РЭБ, начальник отдела, e-mail: ayuryev@bk.ru

Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvf@list.ru

Тюрин Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: svturin@mail.ru

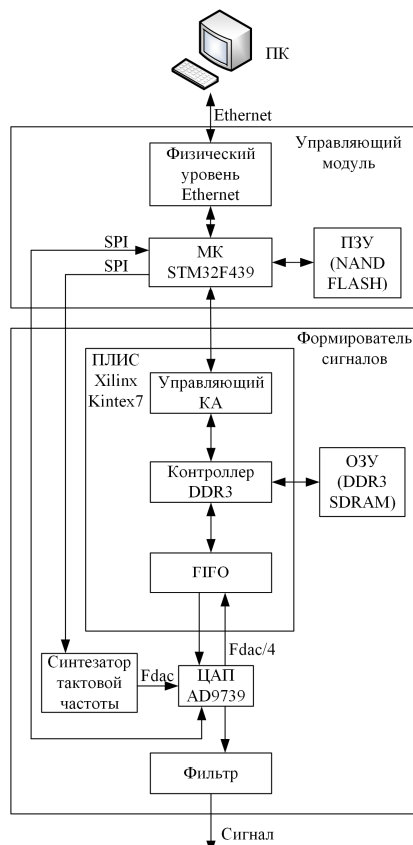


Рис. 1. Структурная схема синтезатора сигналов

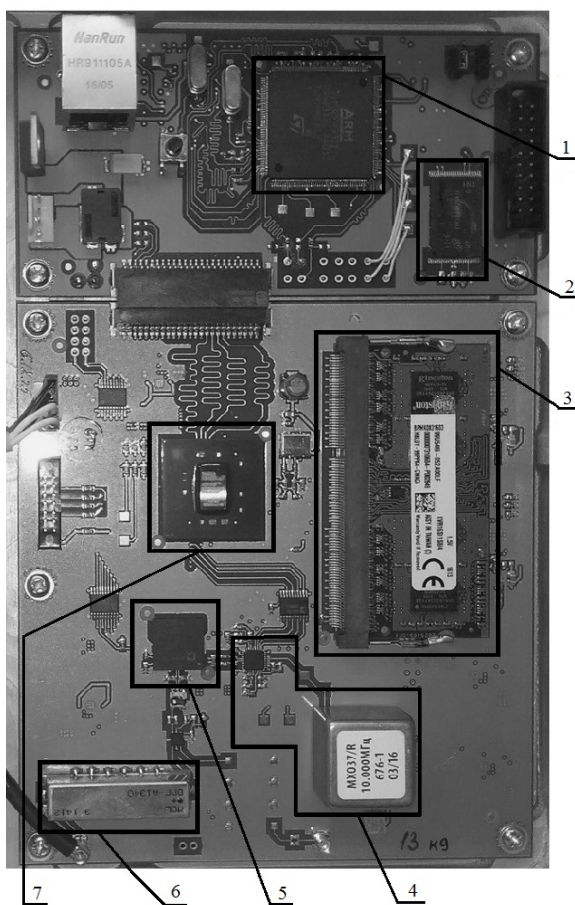


Рис. 2. Внешний вид синтезатора сигналов

Цифрой 2 отмечена микросхема NAND FLASH памяти, которая используется в качестве ПЗУ для хранения отсчетов формируемых сигналов. Объем памяти одной микросхемы составляет 4 Гигабайта.

При формировании сигнала, для хранения отсчетов используется быстрая оперативная память DDR3 (обозначена на рисунке цифрой 3). Формирователь поддерживает работу с модулями памяти объемом до 8 Гбайт, работающими на частоте 400 МГц (DDR3-800).

Цифрой 4 отмечены кварцевый генератор и синтезатор тактовой частоты ЦАП.

Цифрой 5 отмечен ЦАП AD9739 [10]. Данный ЦАП позволяет синтезировать высококачественные широкополосные сигналы в полосе частот до 1.25 ГГц в первой и второй зонах Найквиста. Разрешение одного отчета - 14 бит.

Частотный спектр реального выходного сигнала содержит набор побочных зеркальных спектральных составляющих. Так, например, при формировании синусоидального сигнала на частоте 400 МГц, при частоте дискретизации 2000 МГц в частотном спектре сигнала на выходе ЦАП появятся также его зеркальные составляющие во второй (1600 МГц) и в третьей (2400 МГц) зонах Найквиста. Для подавления частотных составляющих за пределами интересующей полосы частот необходимо использовать фильтрацию.

В данном случае был использован аналоговый фильтр (обозначен цифрой 6 на рис. 2) с полосой пропускания 1000-1800 МГц. Частотный спектр формируемого сигнала до фильтрации и после неё представлен на рис. 3.

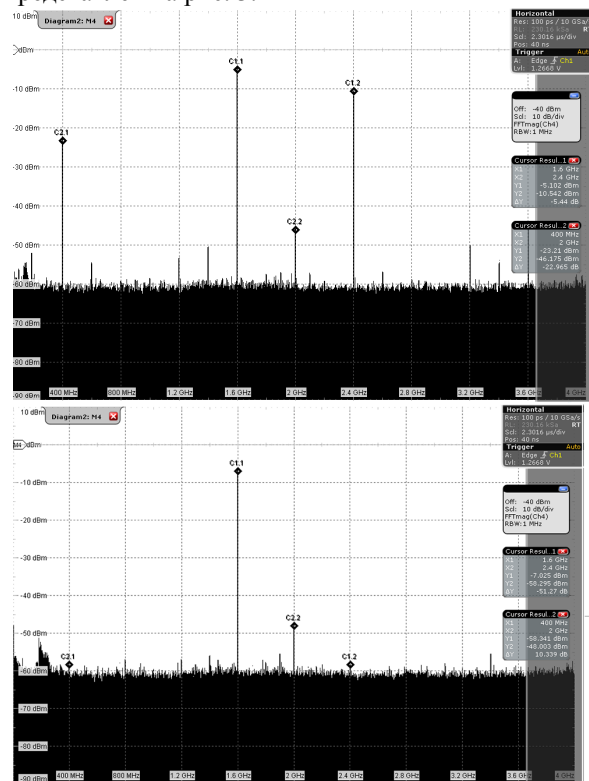


Рис. 3. Результат применения полосового фильтра

Цифрой 7 на рисунке обозначена программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) XC7K70T. С помощью данной ПЛИС реализован контроллер памяти DDR3, конечный автомат для управления контроллером памяти DDR3, а также интерфейс для взаимодействия с ЦАП.

В качестве контроллера памяти DDR3 было использовано IP ядро MIG 7 Series [12].

Так как память DDR3 в качестве запоминающих устройств использует емкостные элементы, контроллер памяти для обеспечения сохранности данных должен периодически запускать процедуру их регенерации (refresh). Следствием этого является то, что скорость считывания данных из памяти не постоянна во времени. Поэтому данные, считанные из ОЗУ формирователя, не подаются напрямую на ЦАП, а предварительно собираются в небольшом буфере FIFO.

Наличие FIFO также накладывает ограничение на возможность быстрой смены излучаемого сигнала (до начала воспроизведения сигнала необходимо иметь в FIFO некоторый минимальный запас отсчетов).

Управляющий конечный автомат

Основным назначением управляющего конечного автомата (УКА) является организация взаимодействия между микроконтроллером управляющего модуля и контроллером памяти DDR3, реализованном на ПЛИС Kintex 7.

Упрощенная диаграмма управляющего конечного автомата представлена на рис. 4.

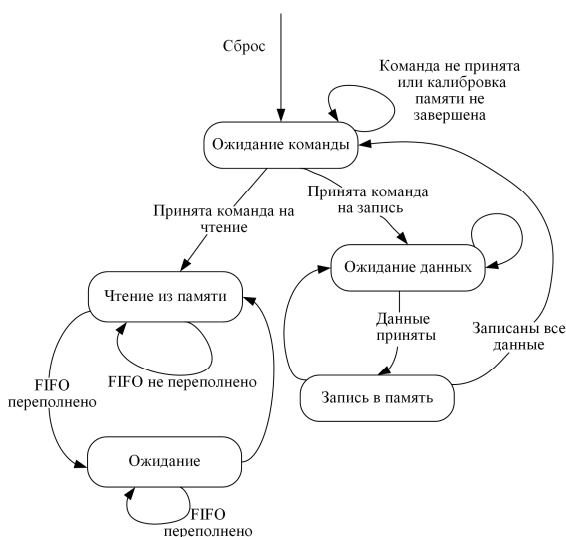


Рис. 4. Диаграмма управляющего конечного автомата

Рассмотрим данную диаграмму более подробно.

После получения команды “сброс” УКА переходит в состояние ожидания команды. Находясь в состоянии ожидания, УКА может получить от управляющего модуля либо команду

на чтение данных из памяти, либо команду на запись данных в память.

При приеме команды на запись передается начальный адрес в памяти DDR3, длина сегмента записываемых данных и отсчеты записываемого сигнала. После окончания приема данных УКА переходит в состояние ожидания команды.

В зависимости от поставленной задачи команда на запись сигнала в память DDR3 может либо выполняться однократно (однократно при запуске формирователя могут загружаться все сигналы из ПЗУ в память DDR3, а далее оператор использует только команды на чтение) либо непосредственно перед каждой командой на чтение может быть вызвана команда на запись

При приеме команды на чтение так же передается начальный и конечный адрес в памяти DDR3. Затем УКА начинает формировать сигналы для контроллера памяти DDR3 таким образом, чтобы обеспечить циклическое чтение из памяти DDR3, прерываясь только по сигналу переполнения FIFO ЦАП. Выход из состояния чтения осуществляется с помощью сигнала сброса.

Один из возможных вариантов реализации УКА на языке Verilog HDL представлен на рис. 5 и представляет собой простой конечный автомат, меняющий свое состояние (определяется значением регистра state) по фронту тактового сигнала clk либо по фронту сигнала сброса rst.

```
always @(posedge clk or posedge rst) begin : FSM
  if(rst) begin //Сброс регистров УКА
    ...
  end
  else
    case(state)
      IDLE : begin //состояние ожидания команды
        ...
      end
      MEM_WRITE: begin //запись в ОЗУ формирователя
        ...
      end
      MEM_READ: begin //чтение из ОЗУ формирователя
        ...
      end
    endcase
  end
end
```

Рис. 5. Реализация УКА на языке Verilog HDL

В качестве корректных состояний УКА отдельно выделены состояния ожидания команды, состояние чтения и состояние записи. Рассмотрим данные состояния более подробно.

Состояние ожидания команды (также как состояние записи и чтения) разбито на 2 состояния: IDLE0 и IDLE1. В состоянии IDLE0 при условии наличия данных от управляющего контроллера (сигнал mcu_data_ready) и сигнала окончания калибровки (init_calib_complete) производится запись начального адреса (start_addr), конечного адреса (end_addr), текущего адреса обращения к

памяти (next_addr), тип принятой команды (rw_mode_reg) а так же переход в состояние IDLE1.

В состоянии IDLE1, в соответствии с кодом принятой команды, происходит переход в состоянии чтения или записи. Реализация описанных действий представлена на рис. 6.

```

IDLE0 : begin
  if(mcu_data_ready & init_calib_complete) begin
    mcu_data_recieved <= 1;
    start_addr <= saddr;
    next_addr <= saddr;
    end_addr <= eaddr;
    rw_mode_reg <= rw_mode;
    state <= IDLE1;
  end
end
IDLE1 : begin
  mcu_data_recieved <= 0;
  case(rw_mode_reg)
    1'b0 : state <= MEM_WRITE0;
    1'b1 : state <= MEM_READ0;
    default : state <= IDLE0;
  endcase
end

```

Рис. 6. Реализация состояния ожидания команды на языке Verilog HDL

```

MEM_WRITE0 : begin
  app_cmd <= 3'b000; //команда записи
  if(mcu_data_ready & app_wdf_rdy) begin
    mcu_data_recieved <= 1;
    app_addr <= next_addr;
    next_addr <= next_addr + 8;
    app_en <= 1;
    app_wdf_data <= mcu_data;
    app_wdf_end <= 1;
    app_wdf_mask <= 64'h0000000000000000;
    app_wdf_wren <= 1;
    state <= MEM_WRITE1;
  end
end
MEM_WRITE1 : begin
  mcu_data_recieved <= 0;
  app_wdf_end <= 0;
  app_wdf_wren <= 0;
  if(app_rdy) begin
    app_en <= 0;
    if(next_addr > end_addr)
      state <= IDLE0;
    else
      state <= MEM_WRITE0;
  end
end

```

Рис. 7. Реализация состояния записи в память на языке Verilog HDL

На рис. 7 и 8 показана реализация в УКА процессов чтения и записи. В состоянии MEM_READ0 УКА управляет контроллером памяти DDR3 таким образом, чтобы тот осуществлял циклическое чтение данных из памяти. Считанные данные затем помещаются в FIFO. При заполнении выше заданного порога, В

состоянии MEM_WRITE0 УКА ожидает приема данных от управляющего модуля (mcu_data_ready) и затем, при условии готовности приема команды контроллером памяти DDR3 (app_wdf_rdy) выставляет необходимые сигналы для осуществления записи принятых данных. Затем УКА переходит в состояние MEM_WRITE1, в котором УКА ожидает корректного завершения процедуры записи данных. Из состояния MEM_WRITE1 УКА может перейти либо в состояние IDLE0 в случае окончания записи данных, либо в состояние MEM_WRITE0 иначе.

FIFO выставляет высокий уровень сигнала dac_fifo_almostfull (признак того, что очередь почти заполнена), и УКА переходит в состояние MEM_READ1, в котором чтение приостанавливается, до тех пор, пока FIFO не освободится.

```

MEM_READ0 : begin
  app_cmd <= 3'b001; //команда чтения
  case( {dac_fifo_almostfull, app_rdy} )
    2'b01 : begin
      app_en <= 1;
      app_addr <= next_addr;
      if(next_addr + 8 > end_addr)
        next_addr <= start_addr;
      else
        next_addr <= next_addr + 8;
      state <= MEM_READ0;
    end
    2'b11 : begin
      app_en <= 0;
      state <= MEM_READ1;
    end
    default : begin
      app_en <= 1;
      state <= MEM_READ0;
    end
  endcase
end
MEM_READ1 : begin
  case( dac_fifo_almostfull )
    1'b0 : begin
      app_en <= 1;
      app_addr <= next_addr;
      if(next_addr + 8 > end_addr)
        next_addr <= start_addr;
      else
        next_addr <= next_addr + 8;
      state <= MEM_READ0;
    end
    default : begin
      app_en <= 0;
      state <= MEM_READ1;
    end
  endcase
end

```

Рис. 8. Реализация состояния чтения из памяти на языке Verilog HDL

Порог включения сигнала `dac_fifo_almostfull` устанавливается таким образом, чтобы не происходило переполнения очереди FIFO.

Временные диаграммы процесса записи и чтения памяти DDR3 представлены на рис. 9 и 10 соответственно.

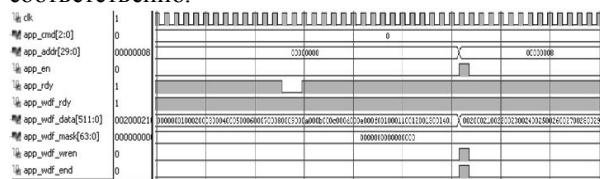


Рис. 9. Временная диаграмма процесса записи в память DDR3



Рис. 10. Временная диаграмма процесса чтения из памяти DDR3

Программное обеспечение управляющего модуля синтезатора сигналов

В качестве основы управляющего модуля был использован микроконтроллер STM32F439 под управлением операционной системы реального времени с открытым исходным кодом FreeRTOS [8]. Данная операционная система позволяет разделить пользовательскую программу на отдельные задачи, для каждой из которых может быть задан различный приоритет, в соответствии с которым ей будет выделяться процессорное время. Во FreeRTOS так же может быть использована невытесняющая многозадачность, очереди, семафоры и мьютексы для синхронизации задач, и многое другое [10].

Программное обеспечение управляющее синтезатором цифровых сигналов реализует две основные задачи:

1) Задача, обеспечивающая работу сетевого интерфейса. Для реализации работы данной задачи был использован TCP/IP стек LwIP - набор API функций позволяющий реализовать многие сетевые протоколы: TCP, UDP, HTTP, FTP и другие [9].

2) Задача, осуществляющая обработку данных, полученных через сетевой интерфейс и взаимодействие с УКА. В соответствии с принятой командой, запускается одна из задач, которая изменяет состояние КА или работает с периферией.

Общая схема работы данной задачи представлена на рис. 11.

Заключение

В работе представлен способ построения формирователя сигналов произвольной формы, а так же один из возможных подходов к разработке программного обеспечения, управляющего его работой. Полученные результаты показывают эффективность использования предложенных методов при построении цифровых синтезаторов сигналов произвольной формы.

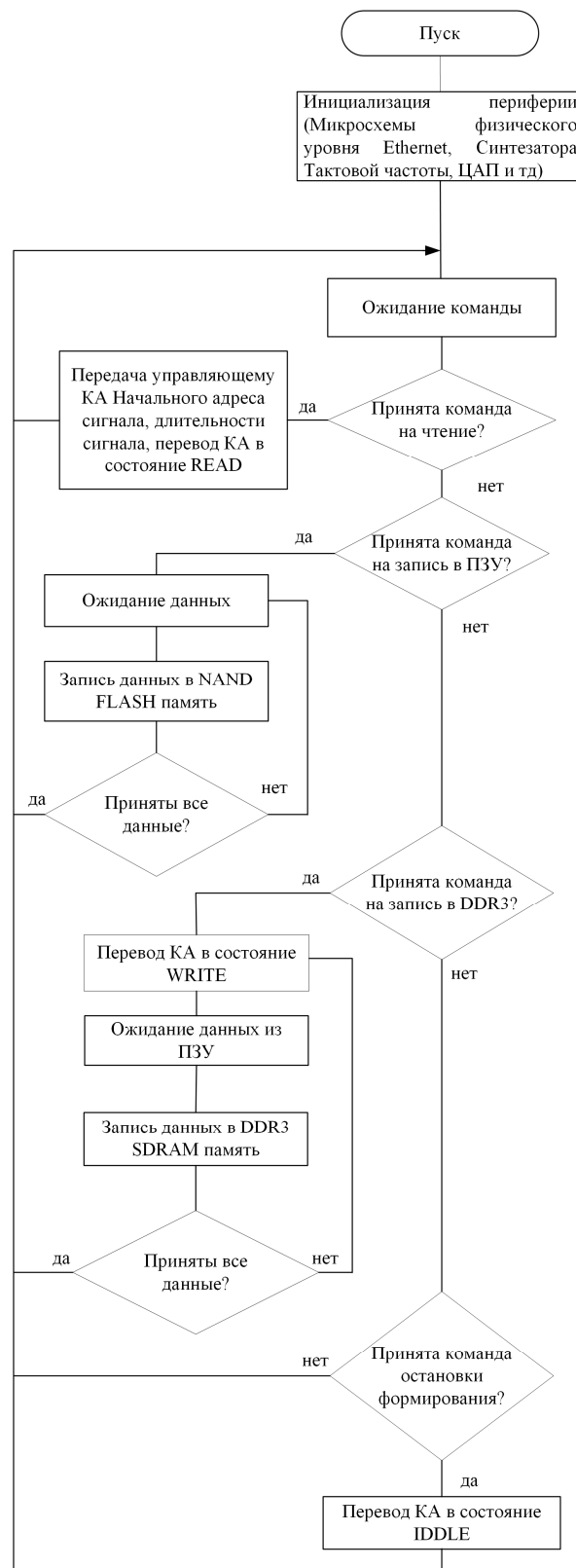


Рис. 11. Схема работы программного обеспечения управляющего модуля

Литература

1. Chua M. Y. FPGA-based chirp generator for high resolution UAV SAR / M. Y. Chua, V. C. Koo // Progress In Electromagnetics Research. - 2009. - Vol. 99. - P. 71–88.
2. Sandhya Ran M. Digital Frequency Synthesis using Multi-Phase NCO for Dielectric Characterization of

Materials on Xilinx Zynq FPGA / M. Sandhya Rani, K. Soundararajan, K. Nagabushan Raju // Global Journal of Researches in Engineering: (F) Electrical and Electronics Engineering. - 2014. - Vol. 14, №7. - P. 14-19.

3. Hervas M. An FPGA Scalable Software Defined Radio Platform Design for Educational and Research Purposes / M. Hervas, R. M. Alsina-Pages, M. Salvador // Electronics. - 2016. - Vol. 5, №2 - P. 53-73.

4. Макаренко В. Компоненты для построения беспроводных устройств связи. Ч. 7: Синтезаторы частоты прямого цифрового синтеза / В. Макаренко // Электронные компоненты и системы. - 2010. - №1. - С. 34-46.

5. Simple QPSK modulator implemented in Virtex 6 FPGA board for satellite ground station / A.M. Moubark, M.A.M. Ali, H. Sanusi, S.M. Ali, N. Zainal // Proceeding of the International Conference on Computer Design. - 2011. - P. 131-135.

6. FPGA implementation of low power digital QPSK modulator using Verilog HDL / A.M. Moubark, M.A.M. Ali, H. Sanusi, S.M. Ali, N. Zainal // Journal of Applied Sciences. - 2013. - P. 38-46.

7. Implementation of DDS Chirp Signal Generator on FPGA / H. Yang, S.-B. Ryu, H.-C. Lee, S.-G. Lee, S.-S. Yong, J.-H. Kim // 2014 International Conference on

Information and Communication Technology Convergence. - 2014. - P. 956 – 959.

8. FreeRTOS - Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions [Электронный ресурс]. - <http://www.freertos.org/index.html> (дата обращения: 16.08.2016).

9. lwIP - A Lightweight TCP/IP stack [Электронный ресурс]. - <http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/> (дата обращения: 16.08.2016).

10. AD9739 (Rev. C) [Электронный ресурс]. - <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9739.pdf> (дата обращения: 16.08.2016).

11. High-performance advanced line, ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 2 Mbytes Flash, 180 MHz CPU, ART Accelerator, Chrom-ART Accelerator, FMC with SDRAM, TFT, HW crypto [Электронный ресурс]. - http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f4-series/stm32f429-439/stm32f439ii.html (дата обращения: 16.08.2016).

12. UG086 Xilinx Memory Interface Generator (MIG), User Guide. - http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ug086.pdf.

Воронежский государственный технический университет

Центр системных исследований и разработок Научно-технического центра радиоэлектронной борьбы (филиал в г. Воронеже)

DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR CONTROL SYSTEM FOR THE DIGITAL SIGNAL SYNTHESIZERS

D.N. Donskih¹, S.A. Popov², A.V. Yurjev³, V.F. Barabanov⁴, S.V. Tyurin⁵

¹Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: dndonskih@gmail.com

²Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: sergey.a.popov@yandex.ru

³Head of department, CSIR NTC REB, Voronezh, Russian Federation
e-mail: sergey.a.popov@yandex.ru

⁴Ph.D., Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: bvf@list.ru

⁵Ph.D., Associate professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: svturin@mail.ru

The article introduces a block diagram of a signal synthesizer of arbitrary shape, consisting of a control module and a signal generation module. The main components of the control module are read-only memory, which was used as a chip NAND Flash memory, and a processor company ST Microelectronics STM32F439. The STM32F439 processor is used to control the signal conditioning module, as well as to organize the operation of the network interface. The signal conditioning module is built using Xilinx XC7K70T programmable logic integrated circuit, DDR3 memory module, Analog Devices AD9739 digital-to-analog converter and bandpass filter.

Considerable attention is paid to the description of the software of the synthesizer of signals. One of the possible variants of implementing the software for the signal conditioning module is presented. It is a finite state machine that provides interaction with a digital-to-analog converter and the possibility of using the SDRAM DDR3 memory module as a random-access memory for storing samples of the generated signal. There is also a possible approach to the development of software for the control module of the synthesizer of signals, the main task of which is the organization of storing the formed signals in memory and servicing the network interface

Key words: digital signal synthesis, signal generation, FPGA, Verilog HDL

References

1. Chua M. Y., Koo V. C., “*FPGA-based chirp generator for high resolution UAV SAR*”, Progress In Electromagnetics Research (2009): 71–88.
2. Sandhya M. Ran, Soundararajan K., Nagabushan Raju K., “*Digital Frequency Synthesis using Multi-Phase NCO for Dielectric Characterization of Materials on Xilinx Zynq FPGA*,” Global Journal of Researches in Engineering 14-7 (2014): 14-19.
3. Hervas M. Alsina-Pages R. M., Salvador M., “*FPGA Scalable Software Defined Radio Platform Design for Educational and Research Purposes*,” Electronics, 5-2 (2016): 53-73.
4. Makarenko V., Ali M.A.M., Sanusi H., Ali S.M., Zainal N., “*Wireless communication devices components, Part 7*” (“*Komponenty dlia postroeniia besprovodnykh ustroystv svyazi, chast 7*”) Elektronnye komponenty i sistemy, 1 (2010): 34-46.
5. Moubark A.M., Ali M.A.M., Sanusi H., Ali S.M., Zainal N., “*Simple QPSK modulator implemented in Virtex 6 FPGA board for satellite ground station*,” Proceeding of the International Conference on Computer Design, (2011): 131-135.
6. Moubark A.M., Ali M.A.M., Sanusi H., Ali S.M., Zainal N., “*FPGA implementation of low power digital QPSK modulator using Verilog HDL*,” Journal of Applied Sciences, (2013): 38-46.
7. Yang H., Ryu S.-B., Lee H.-C., Lee S.-G., Yong S.-S., Kim J.-H., “*Implementation of DDS Chirp Signal Generator on FPGA*,” 2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence, (2014): 956 – 959.
8. FreeRTOS, “*Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions*,” <http://www.freertos.org/index.html>
9. lwIP, “*A Lightweight TCP/IP stack*”, <http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>
10. AD9739 (Rev. C), <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9739.pdf>.
11. High-performance advanced line, “*ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 2 Mbytes Flash, 180 MHz CPU, ART Accelerator, Chrom-ART Accelerator, FMC with SDRAM, TFT, HW crypto*,” http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f4-series/stm32f429-439/stm32f439ii.html.
12. UG086 Xilinx Memory Interface Generator (MIG), User Guide, http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/ug086.pdf.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ С ГАЗОТУРБИННЫМИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМИ АГРЕГАТАМИ НА СТАДИИ РЕКОНСТРУКЦИИ

Л.В. Булыгина, В.И. Рязских

Повышение энергоэффективности компрессорных станций (КС) – актуальная проблема в газовой отрасли, так как компримирование газа является наиболее энергоемким теплоэнергетическим процессом в магистральном транспорте газа. В статье рассмотрены современные методы повышения энергоэффективной работы компрессорных станций на стадии реконструкции: применение на КС газоперекачивающих агрегатов (ГПА) нового поколения с высоким эффективным КПД газотурбинных установок (ГТУ); регенеративное использование теплоты отходящих газов ГТУ; применение модульной компоновки ГПА; снижение гидравлических сопротивлений за счет применения труб с внутренним покрытием. Проведено математическое моделирование и расчет режима проектной производительности КС при замене ГПА на агрегаты нового поколения укрупненной мощности. Применение предложенного подхода при реконструкции компрессорных станций позволит улучшить энергоэффективность КС, уменьшить потребляемую мощность компрессорных станций и снизить затраты топливного газа

Ключевые слова: компрессорная станция, энергоэффективный режим работы, газоперекачивающий агрегат, газотурбинная установка

Введение

В связи с переходом крупнейших газовых месторождений в стадию падающей добычи, перераспределением газовых потоков вследствие строительства новых технологических участков магистральных газопроводов проблема энергоэффективной работы газотранспортной системы становится особенно актуальной [1].

Компримирование газа на компрессорных станциях (КС) является наиболее энергоемким теплоэнергетическим процессом в газовой отрасли [2], поэтому проблема снижения затрат энергоресурсов в первую очередь должна быть направлена на повышение эффективности работы компрессорных станций, как основных потребителей топливно-энергетических ресурсов. Эта задача в значительной степени усиливается, если принять во внимание, что КПД эксплуатируемых на газопроводах газотурбинных установок (ГТУ), суммарная мощность которых составляет свыше 80% от мощности всех других установленных видов энергопривода, в ряде случаев, по разным объективным причинам находится на уровне 20-22% [3].

Энергоэффективным режимом работы компрессорной станции является режим, при котором обеспечиваются необходимые технологические показатели магистрального газопровода (производительность, рабочее давление и температура) при минимуме затрат электроэнергии (для КС с электроприводным парком газоперекачивающих агрегатов (ГПА)) и

минимум затрат топливного газа (для КС с газотурбинным парком ГПА).

Методы обеспечения энергоэффективной работы компрессорной станции на стадии реконструкции

Основными методами повышения энергоэффективности работы КС, применяемыми при реконструкции и новом строительстве, являются:

- выбор оптимального количества и типоразмера ГПА, обеспечивающий снижение энергозатрат (замена морально устаревших и физически изношенных ГПА на агрегаты нового поколения с высоким эффективным КПД ГТУ, применение на КС агрегатов с различной удельной мощностью и т.д.);
- регенеративное использование теплоты отходящих газов ГТУ;
- применение модульной компоновки ГПА;
- снижение гидравлических сопротивлений за счет применения труб с внутренним покрытием.

Выбор оптимального количества и типоразмера ГПА, обеспечивающий энергоэффективную работу КС

Компрессорные цеха и компрессорные станции, реальное техническое состояние которых не обеспечивает компримирование планируемых объемов транспортируемого газа, выступают в качестве «узких мест» магистральных газопроводов.

В настоящее время значительная часть ГПА на КС имеют эксплуатационный КПД, существенно ниже паспортного значения, что приводит к значительному перерасходу топливного газа на перекачку.

Это связано с двумя факторами - снижением технического состояния ГПА (что, в конечном счете, приводит к необходимости их замены) и их

Булыгина Лидия Викторовна – ДООАО «Газпроект-инжиниринг», ведущий инженер, тел. 8(908)130-83-86, e-mail: lidaspitsina@yandex.ru
Рязских Виктор Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

недозагрузкой, что требует решения задачи оптимизации режима работы КС.

Периодическое обновление ГПА на КС – необходимый и закономерный путь улучшения показателей транспорта газа в целом и уменьшения энергозатрат на его осуществление.

Первый этап выбора оптимального количества и типоразмера компримирующего оборудования предусматривает применение расчетно-оценочного метода [5] для определения потребляемой мощности компрессорного цеха (КЦ). Расчеты осуществляются в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 1.

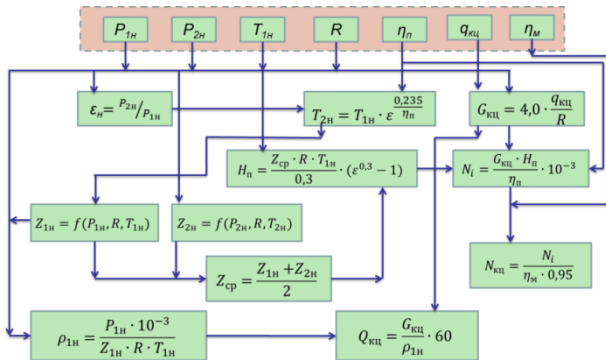


Рис. 1. Блок-схема определения параметров работы КЦ расчетно-оценочным методом, где: $P_{1н}$ ($P_{2н}$) – давление на входе (давление на выходе) КЦ, МПа; $T_{1н}$ ($T_{2н}$) – температура на входе (температура на выходе) КЦ, К; $q_{кц}$ – производительность, млн.м³/сут.; $Z_{1н}$ ($Z_{2н}$) – коэффициент сжимаемости на входе (коэффициент сжимаемости на выходе) КЦ; $Z_{ср}$ – средний коэффициент сжимаемости; ϵ_n – степень повышения давления; R – газовая постоянная, кДж/кг·К; η_p – политропный КПД; η_m – механический КПД; $G_{кц}$ – массовый расход КЦ, кг/с; N_i – внутренняя мощность сжатия КЦ, кВт; $Q_{кц}$ – объемный расход КЦ, м³/мин; $\rho_{1н}$ – плотность газа на входе, кг/м³; $N_{кц}$ – мощность, потребляемая КЦ, МВт; H_n – политропный напор, кДж/кг

Предварительный типоразмер ГПА выбирается на основе значения среднегодовой мощности КЦ в режиме проектной производительности с учетом того, что в отечественной практике применяется мощностной ряд газотурбинных установок 2,5-4-6,3(8)-10(12,5)-16-25 МВт.

Сравнительному анализу должны быть подвергнуты варианты с разными единичными мощностями ГПА.

На следующем этапе расчеты проводятся по конкретным характеристикам ЦБН и ГТУ: определяются величины КПД ЦБН и ГТУ на всех заданных режимах; проверяются условия соответствия потребляемой и располагаемой мощностей ГТУ с целью обеспечения их соотношения в пределах от 0,9 до 0,95 для среднегодового режима; определяются частоты вращения ЦБН и ГТУ на всех заданных режимах и проверяются положения режимных точек в зонах допустимой длительной эксплуатации.

Рассмотрим в качестве примера реконструкцию одной из компрессорных станций

магистрального газопровода Уренгой-Петровск с заменой восьми существующих агрегатов ГТК-10М с центробежным нагнетателем (ЦБН) Н-370-18-1 (схема работы 3х2+2) по двум возможным вариантам: с заменой на 4 агрегата ГПА-16 (при схеме работы 3х1+1), с заменой на 3 агрегата ГПА-25 (при схеме работы 2х1+1).

Эффективность вариантов будем рассматривать по следующим показателям: потребляемая мощность, коэффициент загрузки по мощности и годовой расход топливного газа.

Алгоритм расчета показателей энергоэффективности КС

Расход топливного газа ГТУ, тыс.м³/ч, вычисляют согласно [4] по формуле:

$$q_{гг} = q_{гг}^0 \cdot 0,75 \cdot \frac{N_n}{N_e^0} + 0,25 \cdot K_{Pa} \cdot \frac{T_a}{288} \cdot K_{гг} \cdot K_n,$$

где $q_{гг}^0 = \frac{3,6 \cdot 10^3 \cdot N_e^0}{\eta_e \cdot Q_{гс}}$ – номинальный расход топливного газа, тыс.м³/ч; $K_{гг}$ – коэффициент технического состояния ГТУ (по топливу); N_n – мощность, потребляемая ЦБН, МВт; η_e – номинальный КПД ГТУ; $Q_{гс}$ – теплота сгорания топливного газа, кДж/м³.

Коэффициент использования мощности показывает, насколько эффективно будет использоваться установленная мощность:

$$K_n = \frac{N_n}{N_e^p}, \quad (1)$$

где N_e^p – располагаемая мощность ГТУ, МВт; N_n – потребляемая мощность, МВт;

Располагаемую мощность ГТУ определяют согласно [4] по следующей формуле:

$$N_e^p = N_e^0 \cdot K_N \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_n \cdot K_{Pa}, \quad (2)$$

где N_e^0 – номинальная мощность ГТУ; K_N – коэффициент технического состояния ГТУ (по мощности), принимают равным 0,95, если не имеется оснований для принятия другой величины; K_t – коэффициент, учитывающий влияние температуры атмосферного воздуха; K_y – коэффициент, учитывающий наличие утилизатора тепла; K_{Pa} – коэффициент, учитывающий влияние высоты над уровнем моря; K_n – коэффициент влияния относительной скорости вращения ротора силовой турбины; обычно учитывается в составе коэффициента K_N .

Учёт влияния температур атмосферного воздуха рекомендуется [4] рассчитывать по формуле:

$$K_t = 1 - k_t \cdot \frac{T_a - 288}{T_a}, \quad (3)$$

где T_a – расчетная температура атмосферного воздуха на входе в ГТУ, К; k_t – коэффициент, величину которого для оценочных расчетов рекомендуется принимать 3,0.

Расчётная температура атмосферного воздуха на входе в ГТУ определяется по формуле

$$T_a = T_a^{cp} + 5, \quad (4)$$

где T_a^{cp} – средняя температура атмосферного воздуха расчетного календарного периода, К.

Моделирование технологического режима КС с заменой морально устаревших агрегатов на ГПА нового поколения укрупненной мощности с помощью предложенного алгоритма и результаты эксперимента

Моделирование режима проектной производительности КС с заменой морально устаревших агрегатов ГТК-10М (со схемой

подключения ГПА 3х2+2) на агрегаты нового поколения с высокоэффективными ГТУ ГПА-16 (со схемой подключения ГПА 3х1+1) и ГПА-25 (схема подключения 2х1+1), а также расчет основных технологических параметров поквартально представлены в табл.1, 2. Результаты расчета показателей энергоэффективности КС приведены в табл. 3.

Таблица 1

Моделирование и расчет режима проектной производительности компрессорного цеха с существующими и установленными ГПА (расчетно-оценочный метод)

Наименование	Обозн	Ед. измер.	Формула, источник	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Средне-год.
Производительность	$Q_{кц}$	млн.м ³ /сут.	Задано	89,6	88	82,6	90,7	87,73
Абсолютное давление на входе	$P_{1н}$	МПа	То же	5,5	5,7	5,4	5,35	5,49
Абсолютное давление на выходе	$P_{2н}$	МПа	--/--	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Температура на входе	$T_{1н}$	К	--/--	291	293	296	293	293,25
Степень повышения давления	ε_n	-	$\frac{P_{2н}}{P_{1н}}$	1,364	1,316	1,389	1,402	1,368
Газовая постоянная	R	кДж/кг·К	Расчет по составу	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506
Температура на выходе	$T_{2н}$	К	$T_{1н} \cdot \varepsilon_n^{0,235}$	317,7	316,7	324,9	322,4	320,4
Коэффициент сжимаемости на входе	$Z_{1н}$	-	$f(P_{1н}, T_{1н}, R)$ [4]	0,891	0,891	0,900	0,896	0,894
Коэффициент сжимаемости на выходе	$Z_{2н}$	-	$f(P_{2н}, T_{2н}, R)$ [4]	0,907	0,905	0,916	0,913	0,910
Средний коэффициент сжимаемости	$Z_{ср}$	-	$\frac{Z_{1н} + Z_{2н}}{2}$	0,899	0,898	0,908	0,905	0,902
Политропный напор	H_n	кДж/кг	$\frac{Z_{ср} \cdot R \cdot T_{1н}}{0,3} \cdot (\varepsilon_n^{0,3} - 1)$	43,0	38,1	46,9	47,7	43,9
Массовый расход КЦ	$G_{кц}$	кг/с	$4,0 \cdot \frac{Q_{кц}}{R}$	708,3	695,6	653,0	717,0	693,5
Внутренняя мощность сжатия КЦ (сущ. ГПА)	N_i	кВт	$\frac{G_{кц} \cdot H_n}{\eta_n} \cdot 10^{-3}$	38,1	33,1	38,3	42,7	38,1
Внутренняя мощность сжатия КЦ (новые ГПА)	N_i	кВт	$\frac{G_{кц} \cdot H_n}{\eta_n} \cdot 10^{-3}$	36,7	31,9	36,9	41,2	36,7
Плотность газа на входе	$\rho_{1н}$	кг/м ³	$\frac{P_{1н} \cdot 10^3}{Z_{1н} \cdot R \cdot T_{1н}}$	41,9	43,2	40,1	40,3	41,4
Объёмный расход КЦ	$Q_{кц}$	м ³ /мин	$\frac{G_{кц}}{\rho_{1н}} \cdot 60$	1013,5	967,0	977,9	1068,4	1006,7
Мощность, потребляемая КЦ (сущ. ГПА)	$N_{кц}$	МВт	$\frac{N_i}{\eta_m \cdot 0,95}$	41,3	35,9	41,6	46,4	41,3
Мощность, потребляемая КЦ (новые ГПА)	$N_{кц}$	МВт	$\frac{N_i}{\eta_m \cdot 0,95}$	39,0	33,9	39,3	43,8	39,0

Таблица 2

Моделирование и расчет режима работы проектной производительности по измеряемым и расчетным параметрам КС-18 «Москово» с существующими ГПА ГТК-10М и установленными агрегатами ГПА-16 и ГПА-25 (с учетом характеристик ЦБН)

Наименование	Обозн	Ед. измер.	Формула, источник	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Средне-год.
ГТК-10М/Н-370-18-1. Схема подключения агрегатов 3х2 раб+2 рез.								
Количество рабочих и резервных ГПА	$n_p + n_{рез}$	шт	Задано	3х2+2	3х2+2	3х2+2	3х2+2	3х2+2
Объёмный расход на входе 1 группы ГПА	Q_{I_n}	м ³ /мин	$\frac{Q_{кц}}{n}$	337,8	322,3	326,0	356,1	335,6
Политропный КПД	η_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,81	0,8	0,8	0,81	0,805
Относительная частота вращения	n_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,97	0,93	0,94	0,99	0,96
Внутренняя мощность 1 группы посл. соединенных ГПА	N_i	МВт	$\frac{Q_{I_n} \cdot \rho_{I_n} \cdot H_n}{60 \cdot \eta_n}$	12,5	11,0	12,8	14,1	12,6
Мощность, потребляемая 1 гр. посл. соединенных ГПА	N_n	МВт	$\frac{N_i}{\eta_m \cdot 0,95}$	13,6	12,0	13,9	15,3	13,7
Мощность, потребляемая КЦ	$N_{н кц}$	МВт	$N_n \cdot n$	40,8	35,9	41,6	45,8	41,0
Располагаемая мощность 1 группы ГПА	N_e^p	МВт	$N_e^0 \cdot K_N \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_n \cdot K_{Pa}$	21,5	17,5	17,2	19,7	19,0
Располагаемая мощность КЦ	$N_{е кц}^p$	МВт	$N_e^p \cdot n$	64,5	52,5	51,6	59,1	56,9
ГПА-16. Схема подключения агрегатов 3х1 раб+1 рез.								
Количество рабочих и резервных ГПА	$n_p + n_{рез}$	шт	Задано	3+1	3+1	3+1	3+1	3+1
Объёмный расход на входе ЦБН	Q_{I_n}	м ³ /мин	$\frac{Q_{кц}}{n_p}$	337,8	322,3	326,0	356,1	335,6
Политропный КПД	η_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,864	0,866	0,866	0,864	0,865
Относительная частота вращения	n_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,97	0,93	0,94	0,99	0,96
Внутренняя мощность ЦБН	N_i	МВт	$\frac{Q_{I_n} \cdot \rho_{I_n} \cdot H_n}{60 \cdot \eta_n}$	11,8	10,2	11,8	13,2	11,7
Мощность, потребляемая ЦБН	N_n	МВт	$\frac{N_i}{\eta_m \cdot 0,95}$	12,5	10,8	12,5	14,0	12,5
Мощность, потребляемая КЦ	$N_{н кц}$	МВт	$N_n \cdot n_{раб}$	37,5	32,4	37,5	42,0	37,0
Располагаемая мощность ГПА	N_e^p	МВт	$N_e^0 \cdot K_N \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_n \cdot K_{Pa}$	17,2	14,1	13,7	15,7	15,2
Располагаемая мощность КЦ	$N_{е кц}^p$	МВт	$N_e^p \cdot n_{раб}$	51,6	42,3	41,1	47,1	45,6
ГПА-25. Схема подключения агрегатов 2х1 раб+1 рез.								
Количество рабочих и резервных ГПА	$n_p + n_{рез}$	шт	Задано	2+1	2+1	2+1	2+1	2+1
Объёмный расход на входе ЦБН	Q_{I_n}	м ³ /мин	$\frac{Q_{кц}}{n_p}$	506,7	483,5	488,9	534,2	503,4
Политропный КПД	η_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,845	0,842	0,848	0,849	0,846
Относительная частота вращения	n_n	-	$f(Q_{I_n}, H_n) [4]$	0,97	0,93	0,97	1	0,97
Внутренняя мощность ЦБН	N_i	МВт	$\frac{Q_{I_n} \cdot \rho_{I_n} \cdot H_n}{60 \cdot \eta_n}$	18,0	15,7	18,1	20,1	18,0
Мощность, потребляемая ЦБН	N_n	МВт	$\frac{N_i}{\eta_m \cdot 0,95}$	19,2	16,7	19,2	21,4	19,1
Мощность, потребляемая КЦ	$N_{н кц}$	МВт	$N_n \cdot n_{раб}$	38,3	33,5	38,4	42,8	38,3
Располагаемая мощность ГПА	N_e^p	МВт	$N_e^0 \cdot K_N \cdot K_t \cdot K_y \cdot K_n \cdot K_{Pa}$	26,8	22	21,5	24,7	23,75
Располагаемая мощность КЦ	$N_{е кц}^p$	МВт	$N_e^p \cdot n_{раб}$	53,6	44	43	49,4	47,5

Таблица 3

Итоговые данные расчета энергозатрат компрессорного цеха с установленными ГТК-10М и с заменой существующих агрегатов на ГПА-16 и ГПА-25 (режим проектной производительности)

Наименование показателей	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Средне-год.
1. Схема работы ГПА - ГТК-10М - ГПА-16 - ГПА-25	3x2+2 3x1+1 2x1+1				
2. Потребляемая мощность, МВт - одной группы послед. соединенных ГТК-10М - одним ГПА-16 - одним ГПА-25	13,6 12,5 19,2	12,0 10,8 16,7	13,9 12,5 19,2	15,3 14,0 21,4	13,7 12,5 19,1
3. Потребляемая мощность КЦ, МВт - с установленными ГТК-10М - с установленными ГПА-16 - с установленными ГПА-25	40,8 37,5 38,3	35,9 32,4 33,5	41,6 37,5 38,4	45,8 42,0 42,8	41,0 37,5 38,3
4. Коэффициент использования мощности - КЦ с установленными ГТК-10М - КЦ с установленными ГПА-16 - КЦ с установленными ГПА-25	0,633 0,727 0,715	0,684 0,769 0,760	0,806 0,916 0,894	0,775 0,893 0,867	0,725 0,826 0,809
5. Номинальный расход топливного газа, тыс. м ³ /ч - на одну группу послед. соединенных ГТК-10М - на один ГПА-16 - на один ГПА-25	8,83 4,71 7,57	8,83 4,71 7,57	8,83 4,71 7,57	8,83 4,71 7,57	8,83 4,71 7,57
6. Расход топливного газа, тыс. м ³ /ч - на одну группу послед. соединенных ГТК-10М - на один ГПА-16 - на один ГПА-25	6,94 4,07 6,46	6,45 3,73 5,95	7,11 4,13 6,55	7,55 4,45 7,02	7,01 4,10 6,50
7. Время расчетного периода, ч	2160	2184	2184	2208	8760
8. Потребление топливного газа за расчетный период, млн. м ³ - КЦ с установленными ГТК-10М - КЦ с установленными ГПА-16 - КЦ с установленными ГПА-25	44,95 26,40 27,91	42,25 24,45 25,97	46,60 27,07 28,60	50,00 29,45 31,02	184,28 107,64 113,80

Таким образом, реконструкция компрессорной станции с установкой агрегатов нового поколения с эффективным КПД ГТУ 35÷36% позволяет сократить потребление топливного газа на 41,6% за год при установке четырех агрегатов ГПА-16 (3x1+1), на 38,2% за год при установке трех агрегатов ГПА-25 (2x1+1). Потребляемая мощность компрессорного цеха снижается на 8÷10% при установке ГПА-16, на 6,5÷7,7% при установке ГПА-25.

Применение модульной компоновки ГПА и КС

Понятие «модульная КС» и «модульный ГПА» обозначают агрегатный принцип формирования оборудования и систем, т.е. ГПА включает в себя аппараты воздушного охлаждения газа (АВОГ), пылеуловитель и вспомогательные системы. В настоящее время имеется необходимость для дальнейшего развития проектных решений, которые можно сформулировать в виде концепции «модульной» КС [6].

В настоящее время на компрессорных станциях России преобладает классическая схема технологической обвязки оборудования и трубопроводов (рис. 2). К особенностям классической обвязки можно отнести разбивку

основного технологического оборудования на три основные функциональные группы:

- 1) группу пылеуловителей;
- 2) группу газоперекачивающих агрегатов;
- 3) группу аппаратов воздушного охлаждения газа.

Каждая группа оборудования объединена между собой через коллекторную трубопроводную обвязку компрессорного цеха. Недостатками классической коллекторной обвязки, помимо высокой металлоемкости трубопроводной обвязки и значительной площади территории КС, являются высокие газодинамические потери в технологических трубопроводах.

Основной акцент при проведении реконструкции компрессорных станций с применением технологических модулей сделан на следующем: снижении гидравлических потерь в технологическом оборудовании и трубопроводах; повышении технико-экономических показателей КС, в том числе увеличении надежности оборудования и трубопроводов КС; уменьшении сроков и стоимости строительства, снижении эксплуатационных затрат.



Рис. 2. Классическая схема обвязки основного технологического оборудования



Рис. 3. Блочно-модульная схема обвязки основного технологического оборудования КС

На рис. 4 представлена блочно-модульная компрессорная установка мощностью 16 МВт на основе газоперекачивающего агрегата типа ГПА-16/76ПС-90 (ДГ90)-АГ разработки ЗАО «Искра-Авиагаз» [6]. Компоновка блочно-модульной компрессорной установки для компрессорного цеха состоит из всасывающей линии, ГПА-16 / 76ПС-90 (ДГ90)-АГ, линии нагнетания и линии рециркуляции.

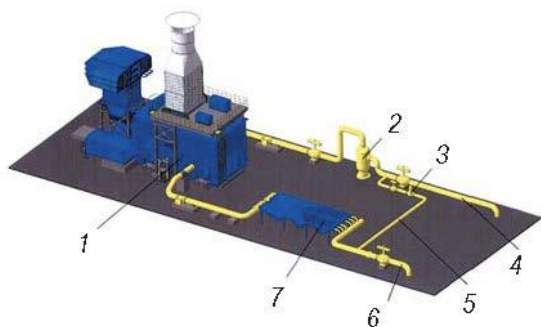


Рис. 4. Блочно-модульная компрессорная установка мощностью 16 МВт:
1 – ГПА; 2 – фильтр-сепаратор; 3 – антипомпажный клапан «Моквелд»; 4, 5, 6 – линии всасывания, рециркуляции и нагнетания, соответственно; 7 – АВО газа

Особенностями компоновки КС с применением блочно-модульной установки (рис. 3) являются:

- размещение линии рециркуляции газа непосредственно в технологическом модуле, что позволяет исключить общецеховую линию

рециркуляции газа и значительно сократить общую длину станционных трубопроводов;

- индивидуальная поагрегатная обвязка АВО газа, что ведет к снижению турбулентной, вибрационной составляющей и позволяет повысить надежность технологических трубопроводов.

Переход на блочно-модульную компоновку КС позволит снизить суммарные потери давления газа в фильтр-сепараторах и в АВО газа от 0,17 до 0,05 МПа [6], что приведет к снижению необходимой степени повышения давления в нагнетателе газа, потребляемой мощности нагнетателя и позволит за счет этого получить экономию до 8–9 % топливного газа на каждом ГПА.

Снижение гидравлических сопротивлений за счет применения труб с внутренним покрытием

В проектах новых магистральных газопроводов (МГ) трубы с внутренним покрытием используются, в первую очередь, для повышения производительности. Применение данного технического решения при реконструкции линейной части эксплуатируемых МГ является одним из методов повышения энергоэффективности [2,7,8], позволяющим сократить потребляемую мощность и расход топлива на КС.

Основным достоинством «гладкостных» покрытий является снижение трения при транспортировке газа.

Наряду с этим можно выделить ряд положительных факторов применения «гладкостных» внутренних покрытий:

- экономия энергозатрат на перекачку и сжатие в процессе эксплуатации трубопровода обеспечивает окупаемость внутреннего покрытия за 3-5 лет [2];

- улучшенный режим движения газа. Турбулентность потока значительно снижается при наличии внутреннего покрытия, что ведет к снижению критических состояний, определяемых режимом движения газа;

- значительное снижение капитальных затрат за счет возможности уменьшения диаметра трубопровода, обусловленной повышением его пропускной способности.

Установлено, что для газопроводов достаточно нанести покрытие толщиной 40-75 мкм.

Для магистральных газопроводов эффективность применения гладкостных покрытий прямо пропорциональна диаметру трубопровода.

Замена 1 км участка газопровода с применением труб с внутренним покрытием снижает потребляемую мощность КС [2] на 30,5-70,6 кВт; при применении труб с внутренним покрытием вдоль всего участка газопровода между КС (110 км) потребляемая мощность эксплуатируемой станции снижается на 22-23 %. Локальный энергосберегающий эффект зависит от места применения внутреннего покрытия: с увеличением протяженности реконструируемой части МГ снижается потребляемая мощность КС.

Как показал анализ [2], замена 1 км в начале и в конце участка газопровода даёт одинаковый результат. Поскольку МГ преимущественно работают в квадратичной зоне сопротивления, то увеличение степени расширения транспортируемого газа на участке газопровода между КС описывается параболической зависимостью. При замене 1 км с применением внутреннего покрытия в начале участка газопровода снижение степени расширения газа меньше, однако данный эффект распространяется вдоль всего участка между КС, обуславливая в конце участка одинаковое снижение скорости газа, как и при замене 1 км трубы с применением внутреннего покрытия в конце участка газопровода.

Величина энергосберегающего эффекта при применении внутреннего покрытия определяется геометрической конфигурацией участка газопровода (внутренний диаметр, протяженность), газодинамическими параметрами транспорта газа и в условиях режимно-технологической неравномерности работы МГ имеет переменное значение.

Регенеративное использование теплоты отходящих газов ГТУ

Снижение энергозатрат на транспорт газа по газопроводу в значительной степени связано с эффективностью работы самих газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и, в первую очередь, газотурбинных установок (ГТУ) как основного вида энергопривода центробежных нагнетателей на компрессорных станциях.

Повышение экономичности газотурбинных установок, как одного из основных видов энергопривода КС, может быть осуществлено различными способами и, в частности, за счет теплотехнического совершенства схемы ГТУ посредством введения в нее регенерации тепла отходящих газов [8,9].

Суть метода заключается в снижении расхода топлива за счёт сокращения потерь теплоты с уходящими газами. Основные потери в газотурбинной установке - это потери теплоты с уходящими газами, которые составляют 60...70 %, а иногда и более процентов от подводимой с топливом энергии. В простой ГТУ газы, покидающие турбину, имеют высокую температуру 400...450°C. Поэтому энергоэффективность ГТУ существенно повысится, если применить регенерацию теплоты, т.е. использовать часть уходящей теплоты для подготовки сжатого воздуха, поступающего в камеру сгорания. Схема ГТУ с регенерацией теплоты показана на рис. 5. Воздух после компрессора 1 пропускать через регенератор 2, который представляет собой теплообменный аппарат поверхностного типа. Туда же в регенератор 2 после газовой турбины 4 направляются отработавшие газы, которые отдают часть своего тепла воздуху и затем удаляются в атмосферу. В регенераторе температура воздуха повышается на 180...250°C, так что необходимое

количество топлива, расходуемое на подогрев воздуха в камере при этом уменьшается, энергоэффективность ГТУ возрастает по сравнению с энергоэффективностью простой ГТУ без регенерации.

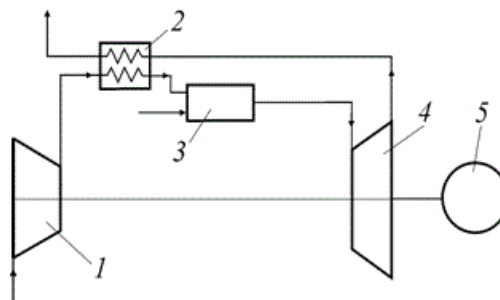


Рис. 5. Схема ГТУ с регенерацией теплоты уходящих газов: 1-компрессор; 2-регенератор; 3 - камера сгорания; 4-турбина; 5 – нагрузка

Таким образом, решение задачи по экономии топливного газа на КС за счет регенерации теплоты отходящих газов на ГПА может быть осуществлено за счет перевода части эксплуатируемых ГТУ без регенеративного типа для работы по регенеративному циклу.

Выводы

Применение рассмотренных в статье подходов при проектировании на стадии реконструкции компрессорных станций позволит улучшить показатели энергоэффективности КС, уменьшить потребляемую мощность компрессорных станций и снизить затраты топливного газа.

Литература

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. №1715-р. Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года [Текст]// Собрание законодательства РФ. - 2009. - №48. - ст.5836. - 103 с.
2. Щуровский, В.А. Энергоэффективность магистрального транспорта газа и потребности в газоперекачивающей технике / В.А. Щуровский, В.В. Зюзьков // Компрессорная техника и автоматика. – 2011. - №1. – С.38-41.
3. Дяченко, А.И. Обоснование выбора энергопривода при реконструкции компрессорных станций магистральных газопроводов /А.И. Дяченко, А.С. Лопатин, Б.П. Поршаков //Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: тез. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. - Новополюк: УО «ПГУ», 2003.- С. 92.
4. СТО Газпром 2-3.5-051-2006. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов. - М.: ВНИИГ аз, 2006. - 187 с.
5. Р Газпром 2-3.5-281-2008. Рекомендации по выбору основного технологического оборудования для транспорта газа. - М.:ВНИИГ аз, 2009. - 73 с.

6. Амирова, Е.Г. Блочно-модульная компрессорная установка мощностью 16 МВт разработки ЗАО «Искра-Авигаз» / Е. Г. Амирова, А. Ю. Ощепков // Газовая промышленность.- М.: ЗАО «Камелот-паблишинг», 2013.- №11 (698).- С.38-41.

7. Галиуллин, З.Т. Ресурсосберегающие технологии в трубопроводном транспорте газа/ З.Т. Галиуллин//Газотранспортные системы и технологии сегодня и завтра: сб. науч. тр. – М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008.- С. 80-92.

8. Апостолов, А.А. Развитие элементов ресурсосберегающих технологий трубопроводного транспорта природных газов / А.А. Апостолов, А.С. Лопатин, Б.П. Поршаков. - М.: ИРЦ Газпром, 1997. –С. 24-26.

9. Поршаков, Б.П. Газотурбинные установки на газопроводах / Б.П. Поршаков, А.А. Апостолов, А.Н. Козаченко. - М.: Нефть и газ, 2004.- 215 с.

Дочернее открытое акционерное общество «Газпроектинжиниринг», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

METHODOLOGY FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF COMPRESSOR STATIONS WITH GAS TURBINE GAS COMPRESSOR UNITS UNDER THE RECONSTRUCTION

L.V. Bulygina¹, V.I. Ryazhskikh²

¹Engineer, DOAO «Gazproektengineering», Voronezh, Russian Federation
e-mail: lidaspitsina@yandex.ru

²Ph.D., Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

Improving the energy efficiency of compressor stations (CS) is an acute problem in the gas industry, since the gas compression is the most energy-intensive heat and power process. The article reviews modern methods of increasing the energy efficiency of compressor stations on the reconstruction phase; application of brand new generation of gas compressor units (GPU) with high efficient coefficient of performance gas turbine units (GTU), regenerative use of heat of exhaust gas of gas turbine plants, the use of a modular layout of gas pumping units, reduction of hydraulic resistance through the use of tubes with internal coating.

Mathematical modeling and calculation mode design applied to calculate the capacity of the compressor station during the replacement of gas pumping units as new power generation units are being enlarged. The use of the proposed approach to the reconstruction of compressor stations will improve the energy efficiency of compressor stations, reduce the power consumption of compressor stations and cut the cost of fuel gas sufficiently

Key words: compressor station, energy-efficient operation, gas compressor unit, gas turbine power plant

References

1. "Decree of the RF Government as of 13.11.2009 №1715-city district. On the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030" ("Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 13.11.2009 g. №1715-r. ob Energeticheskoy strategii Rossii na period do 2030 goda"), Collection of the RF Legislation 48-5836 (2009): 103.
2. Shchurovsky V.A., Zyuz'kov V.V., "Energy efficiency gas trunk line and the requirements for gas-pumping equipment" ("Energoeffektivnost' magistral'nogo transporta gaza i potrebnosti v gazoperekachivajushhej tehnike"), Compressors and Equipment 1 (2011): 38-41.
3. Dyachenko A.I., Lopatin A.S., "The justified choice of energy drive in the reconstruction of compressor stations of main gas pipelines" "Obosnovanie vybora jenergoprivoda pri rekonstrukcii kompressornyh stancij magistral'nyh gazoprovodov"), Abstracts of the IV Scientific-Technical Conference "Reliability and safety of the main pipeline transport" (2003): 92.
4. STO Gazprom, "Norms of technological design in the construction of the main pipelines" ("Normy tehnologicheskogo proektirovaniya magistral'nyh gazoprovodov"), VNIIGAZ (2006): 187.
5. R Gazprom, "Recommendations regarding the selection of the main technological equipment for gas transportation" ("Rekomendacii po vyboru osnovnogo tehnologicheskogo oborudovaniya dlja transporta gaza"), VNIIGAZ (2009): 73.
6. Amirova E.G., Oshchepko A.Y., "Modular compressor unit capacity of 16 MW development at "Iskra-Avigaz" ("Blochno-modul'naja kompressornaja ustanovka moshhnost'ju 16 MVt razrabotki ZAO «Iskra-Avigaz»"), Gas promyshlennos JSC "Camelot-Publishing» 11- 698 (2013) 38-41.
7. Galiullin Z.T., "Resource-saving technologies in the pipeline transportation of gas" ("Resursosberegajushhie tehnologii v truboprovodnom transporte gaza"), Gas Transportation Systems and technologies today and tomorrow: Collection of scientific papers. - М.: "VNIIGAZ" LLC (2008): 80-92.
8. Apostolov A.A., Lopatin A.S., Porshakov B.P., "Development of resource-saving technologies of pipeline transportation of natural gas" ("Razvitie jelementov resursosberegajushhih tehnologij truboprovodnogo transporta prirodnih gazov") IRC Gazprom (1997): 24-26.
9. Porshakov B.P., Apostolov A.A., Kozachenko A.N., Nikishin V.I. "Gas turbine installation for the pipelines" ("Gazoturbinnnye ustanovki na gazoprovodah"), М.: Oil and Gas 2004.- 215.

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ АСУЭ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов

В статье рассматриваются методы микроконтроллерной реализации датчика сдвига фаз для высоковольтных регуляторов напряжения с применением различных способов определения сдвига фазы. Рассмотрены два варианта реализации датчика как системы вычисления значения сдвига фаз: на основе нуля органов (система вычисляет время между переходами через ноль преобразованного сигнала напряжения сети и преобразованного сигнала тока сети) и на основе метода обратного косинусного и синусного преобразования с оценкой значения сдвига фазы в период между переходами через ноль преобразованного сигнала напряжения и тока сети. Показано преимущество такого метода в получении мгновенного значения сдвига фазы, что позволяет добиться высокой скорости обработки АСУЭ заданий по регулированию перетоков мощности в сетях и быстрого отклика на возможные аварийные возмущения. В статье проведено имитационное моделирование датчика, получены график переходного процесса при набросе активно-индуктивной нагрузки в сети и график выходного значения смоделированного датчика

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, датчик тока, тиристорный регулятор

В высоковольтных сетях с распределенными параметрами из-за присутствия реактивных составляющих в питаемой нагрузке существует сдвиг фаз напряжения относительно тока, ведущее к дополнительным потерям, свойственным всем сетям переменного тока. Для компенсации данных потерь (потерь от реактивной мощности) используются специально разработанные компенсационные устройства, как управляемые, так и неуправляемые. Для эффективной работы подобных устройств, а также функционирования автоматизированных систем управления энергоснабжением АСУЭ вышеупомянутых сетей требуется определение времени сдвига фазы между напряжением и током, то есть время между переходом тока и напряжения через ноль.

Также необходимость применения подобной системы возникает при работе тиристорного регулятора напряжения (рис.3).

На рисунке показана электрическая схема одной фазы силового автотрансформатора (АТ), где обмотка среднего напряжения обозначена $W2$, высокого напряжения – $W1$, а низкого напряжения – $W3$. Включенный в нейтраль АТ вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) имеет две обмотки $W4$ и $W5$, запитан от третичной обмотки АТ через две группы силовых ключей $V1$ и $V2$, осуществляющих регулирование напряжения на $W1$. Такой способ управления, благодаря высокому быстродействию и плавности регулирования напряжения, позволяет обеспечить снижение кратности перенапряжений и увеличение пропускной способности ЛЭП. [1,2]

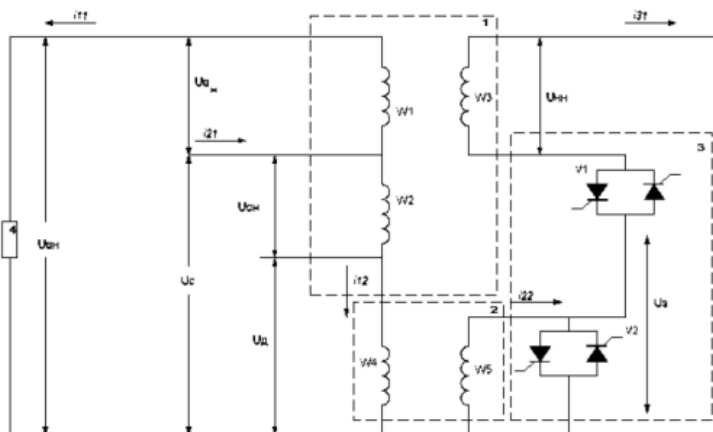


Рис. 1. Тиристорный регулятор напряжения на основе автотрансформатора

Для управления вентилями требуется точное определение фазы сигнала, угла между током и

напряжением, мгновенных значений токов и напряжений и т.д.

Крысанов Валерий Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-228-56-06, e-mail: sovteht2000@mail.ru
Шарапов Юрий Викторович – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-434-85-50, e-mail: y.v.sharapov@list.ru

Для комплексного решения проблемы детерминирования данных параметров и вычисления управляющих воздействий на вентили в соответствии с требуемым оптимумом обычно используют вычислительные комплексы, основанные на логических элементах или промышленных контроллерах.

В качестве первичных преобразователей тока и напряжения в высоковольтных сетях, перспективными к применению являются оптоволоконные преобразователи тока и напряжения, а также (в основном используемые в настоящее время) трансформаторные датчики. Основные моменты в работе с подобными преобразователями описаны в [3]. Выходом подобных преобразователей как правило является сигнал напряжения, который можно уже напрямую приводить к входу цифровых и аналоговых схем. В данной статье будут рассмотрены методы преобразования данных сигналов для получения цифрового кода пропорционального сдвигу фаз, а также дискретных сигналов, соответствующих критическому повышению напряжения или тока, требуемых для организации системы управления трансформаторно-тиристорным регулятором напряжения.

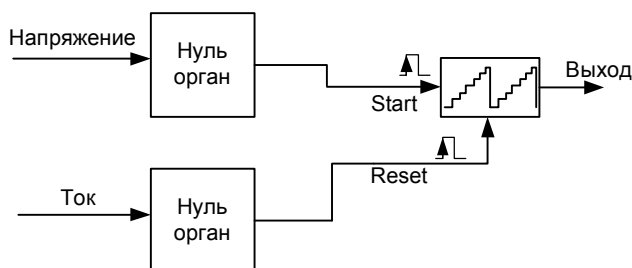


Рис. 2. Формирование кода сдвига фаз методом подсчета времени перехода через ноль

Данный метод подходит также для реализации в микроконтроллерной системе управления, для этого используется специализированный модуль InputCapture входящий в состав современных прогрессивных микросхем таких мировых лидеров как STmicroelectronics, Atmel, Texas Instruments [5].

При втором методе сигналы преобразовываются в ряд Фурье, и соответственно можно определить амплитудные значения каждого из сигналов и их фазы. Разность фаз при этом определяется прямым вычитанием, однако стоит отметить, что для преобразования Фурье требуется

Для определения сдвига фазы как правило применяют два основных метода: первый – определение времени между переходом через ноль сетевого напряжения и тока, и определение разности фаз после преобразования Фурье напряжения и тока [4].

При первом методе после сигналов напряжения и тока ставятся соответствующие нуль органы (подающие логическую единицу на выход при переходе через ноль сигнала на входе) и сбрасываемый счетчик (аналоговый или цифровой). Счетчик стартует преобразования при переходе через ноль одного сигнала и завершает преобразование при переходе через ноль другого сигнала. Полученный на выходе результат пропорционален сдвигу между током и напряжением.

большое количество аналогово-цифровых преобразований в выборке как минимум периода от синусоиды. Таким образом, можно сказать, что не один из них не имеет большого быстродействия в пределах полупериода. То есть нельзя увидеть мгновенное значение фазового запаздывания.

Для решения данной проблемы можно воспользоваться свойством линейности синусоидального сигнала на периоде. Общая структура системы определения мгновенного значения сдвига фаз приведена на рисунке 3.

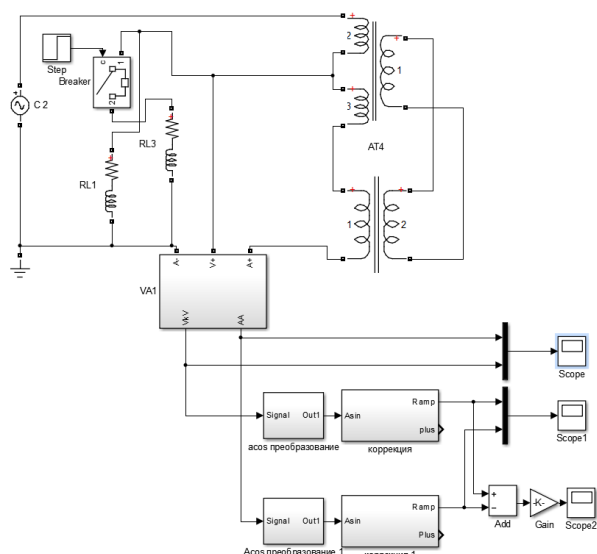


Рис. 3. Структура системы определения мгновенного значения сдвига фаз

На рисунке показана схема преобразователя сдвига фазы, в системе высоковольтной сети. Сигнал с преобразователя напряжения (или тока) приходит на блок acos преобразования, после чего на выходе получается угол (мгновенный относительный входного сигнала) далее этот сигнал идет в блок коррекции, где преобразуется в

нарастающий (пилообразный) сигнал с наклоном пропорциональным изменению угла входного сигнала (синусоидального). Выходы блоков коррекции взаимно вычитаются в результате чего получается сигнал (или код) сдвига фаз между током и напряжением. Блок acos преобразования приведен на рис. 4.

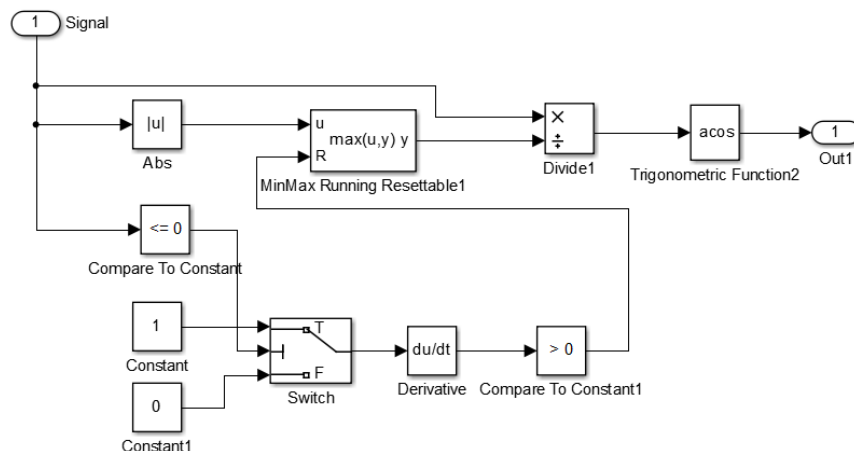


Рис. 4. Блок acos преобразования.

Блок преобразует входной синусоидальный сигнал произвольной амплитуды в арккосинус от угла данного сигнала. Для преобразования сигнал приводится к единичной амплитуде делением на максимальное значение амплитуды на периоде. После чего производится преобразование acos. Для

деления используется значение максимальной амплитуды на прошлом периоде функции. Такое построение преобразователя не сказывается на быстродействии системы, так как при большой постоянной времени амплитуда входного сигнала не может сильно измениться на периоде.

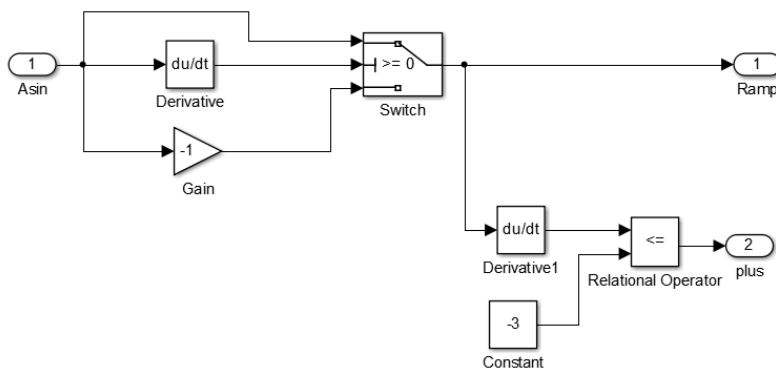


Рис. 5. Блок коррекции

Блок коррекции преобразует треугольный сигнал арккосинуса в пилообразный. Определения направления счета происходит по знаку производной от входного сигнала.

Результат работы датчика приведен на рис. 6. Видно, что после подключения дополнительной

активно-индуктивной нагрузки сразу же происходит рост выходного сигнала датчика. Так как рост выходного сигнала происходит сразу после наброса нагрузки, в отличие от других способов, это позволяет добиться большего быстродействия и реакции системы на аварийные ситуации, чем при использовании стандартных датчиков.

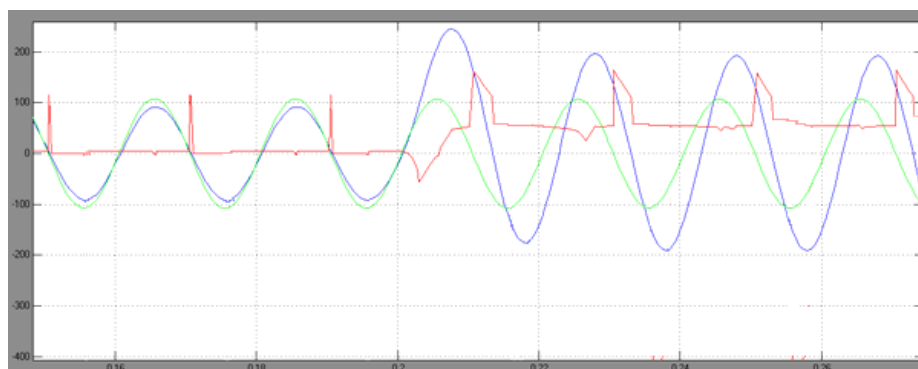


Рис. 6. Результат работы датчика

Литература

1. Крысанов В.Н. Тиристорный регулятор напряжения как средство повышения пропускной способности и снижения перенапряжения в ЛЭП / В.Н. Крысанов // Энергетические комплексы и системы управления. – 2009. - №1. – С. 12-15.
2. Крысанов В.Н. Быстродействующее регулирование напряжения при коротком замыкании в высоковольтных сетях / В.Н. Крысанов, С.В. Астафьев // Энергетические комплексы и системы управления. – 2010. - №1. – С. 56-60.
3. Абраменкова И. Оптические преобразователи тока и напряжения / И. Абраменкова, И. Корнеев, Ю. Троицкий // Компоненты и технологии. – 2010. – №8. – С. 60-63.
4. Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения: учеб. пособие / А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2014. – 142 с.
5. Крысанов В.Н. Использование современных микроконтроллерных средств вычисления для управления устройствами «Гибких» систем передачи переменного тока «FACTS» / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. - №3. – С. 62-66.

Воронежский государственный технический университет

HARDWARE SOLUTION FOR A QUICK-SENSING CURRENT SENSOR FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF POWER CONSUMPTION WITH HIGH VOLTAGE AC REGULATORS

V.N. Krysanov¹, Y.V. Sharapov²

¹Ph.D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: sovteh2000@mail.ru²

²Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: Y.V.Sharapov@list.ru

The article reviews the methods of microcontroller installation of the phase shift sensor for high voltage regulators using various methods of determining the phase shift. Two types of the sensor implementation as a system for calculating the phase shift value are estimated: based on zero bodies (the system calculates the time between zero transformations of the transformed network voltage signal and the converted network current signal) and on the basis of the inverse cosine and sine transformation method with an estimate of the phase shift value in the period between the transitions through zero of the converted voltage signal and the current signal of the network.

The advantage of this method in obtaining the instantaneous phase shift value is shown, which makes it possible to achieve a high speed for regulating power flows in the networks and a rapid response to possible emergency disturbances. The simulation of the sensor is introduced in the article. The transient process graph was obtained in the case of an active-inductive load

Key words: compensating reactive power, current sensor, thyristor regulator

References

1. Krysanov V.N., "Thyristor voltage regulator as a tool for increasing of carrying capacity and decline of overvoltage in power transmission line" ("Tyristornyj regulator napryazheniya kak sredstvo povysheniya propusknoy sposobnosti i snizheniya v LEP"), Voronezh, Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya, 1 (2009): 12-15.
2. Krysanov V.N., Astafev S.V., "Fast-acting regulation of voltage in the time of short current in high-voltages lines" ("Bystrodeystvuyushchee regulirovanie napryazheniya pri korotkom zamykaniy v vysokovolnykh liniyakh"), Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya, 1 (2010): 56-60.
3. Abramenkova I., I. Kornev I., Troitsky Y., "Optical current and voltage convertors" ("Opticheskie preobrazovateli toka i napryazheniya"), Komponenty i tehnologii, 8 (2010): 60-63.
4. Krjukov A.V., "Simulation systems of power supply: tutorial" ("Modelirovanie sistem jelektrosnabzheniya: uchebnoe posobie"), Irkutsk: IrGUPS, (2014): 142.
5. Krysanov V.N., Sharapov Y.V., "Using modern microcontroller devices of computing for control FACTS system devices" ("Ispolzovanie sovremennykh mikrocontrollernykh sredstv vychisleniy dlya uprovleniya ustroystvamy gibhikh system peredachi peremennogo toka"), Voronezh, Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya 3 (2014): 62-66.

ПРИМЕНЕНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЕЛЕЯ-ПЛЕССЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ КРИОГЕННОЙ ЖИДКОСТИ В ТРАКТАХ ШНЕКОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

А.А. Афанасьев, Ю.В. Демьяненко, А.Н. Попков

В статье рассмотрены вопросы моделирования течения реальной криогенной жидкости в трактах шнекоцентробежного насоса жидкостного ракетного двигателя. Дано общее описание эффекта кавитационного срыва насоса. В качестве инструмента исследования выбраны методы вычислительной гидрогазодинамики – пакет ANSYS CFX. При моделировании процессов используется кавитационная модель Рейля-Плессета. Записаны соотношения данной модели, полученные из механических соображений без учета тепловых явлений. Проводится ее верификация для жидкого кислорода. Кроме того, в статье даны рекомендации по построению сетки и выбору граничных условий для подобных задач. Моделирование проведено для отдельно стоящего шнека и шнека совместно с центробежным колесом. Для данных систем исследованы процессы кавитационного срыва и эффект кавитационной разгрузки. Показаны зависимости величины кавитационных каверн от входного давления в шнек. При кавитационной разгрузке отмечена связь разницы темпов снижения относительных параметров с объемом кавитационных каверн. Построены зависимости относительных энергетических параметров при номинальном и повышенном массовых расходах. Описан механизм срыва насоса при повышенных массовых расходах

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, агрегаты подачи, кавитация, компьютерное моделирование

Нарушение сплошности потока жидкости в зоне пониженного давления с образованием полостей заполненных паром и выделившимся из жидкости газом приводит к образованию растягивающих напряжений и разрыву жидкости. Кавитационные каверны, заполненные парами жидкости и выделившимся из жидкости растворенным газом, попадая в область высоких давлений захлопываются, так как пар конденсируется.

Возникновение и развитие кавитации в жидкости связано с наличием ядер кавитации. Ядра кавитации являются теми слабыми точками, в которых нарушается сплошность жидкости и возникают кавитационные явления. На развитие кавитации в жидкостях влияет количество свободных газов и растворенных, выделяющихся в областях пониженного давления [1].

С 60-х годов активно проводятся работы по визуальному исследованию кавитации в осевых и центробежных насосах. Визуальное исследование позволяет провести локализацию кавитационных зон, определить различные типы кавитации и исследовать их влияние на режимы работы насоса [2-5].

В данных работах были выделены несколько основных стадий кавитации:

- Зарождение кавитации. Каверны возникают на периферии входных кромок лопаток шнека;

- Блуждающая кавитация. Каверны с понижением входного давления распространяются по лопасти и наблюдаются в большинстве случаев только на отдельных лопастях;

- Неустановившаяся кавитация. Пульсации объема каверны с дальнейшим понижением давления на входе;

- Кавитационный срыв. Кавитируют все лопасти и каверны распространены по всей их поверхности.

Кавитация приводит к нескольким основным негативным эффектам для насосов:

- к срыву режима работы – резкому снижению напора и КПД;

- к эрозионному разрушению рабочего колеса машины, что для насосов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) не актуально ввиду незначительной длительности их работы;

- низкочастотным автоколебаниям давления, приводящим к неустойчивой работе агрегата подачи.

С развитием вычислительной гидрогазодинамики часть экспериментов по исследованию кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах стало возможно заменить компьютерными экспериментами, позволяющими более детально изучить протекающие в насосах процессы [6]. Рассмотрим кавитационную модель Рейля-Плессета. Дифференциальное уравнение, описывающее рост газовых пузырей

Афанасьев Александр Александрович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент; АО КБХА, инженер-конструктор, e-mail: afanasyev.alex.alex@gmail.com

Демьяненко Юрий Васильевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор; АО КБХА, главный специалист по агрегатам подачи, e-mail: cadb@mail.ru

Попков Александр Николаевич – Краснодарское ВВАУЛ (г. Борисоглебск), курсовой офицер-преподаватель, капитан, e-mail: popkov.group@yandex.ru

жидкости, может быть записано в следующем виде [7,8]:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (1)$$

где R_B – радиус кавитационного пузыря, p_v – давление насыщенного пара при заданной температуре, p – давление в жидкости, ρ_f – плотность жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости на границе кавитационной каверны.

Следует отметить, что данное выражение получено из механических соображений без учета тепловых явлений, которые ограничивают рост кавитационных каверн. Тепловые эффекты оказывают наибольшее влияние на течение в осевых и оседиагональных ступенях водородных насосов, где при испарении происходит значительное снижение температуры среды, сопровождающееся снижением давления насыщенных паров водорода. Создание такой математической трехмерной модели на данный момент проводится в АО КБХА.

В (1) пренебрегая производными второго порядка и поверхностным натяжением жидкости получим:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (2)$$

Скорость изменения объема и массы сферического пузырька с учетом (2) может быть выражена как

$$\begin{aligned} \frac{dV_B}{dt} &= 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}; \\ \frac{dm_B}{dt} &= 4\pi R_B^2 \rho_g \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ_g – плотность пара, заполняющего кавитационную каверну.

Если на единицу объема приходится N_B сферических пузырьков, то объемную долю пара можно выразить как

$$r_g = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение, описывающее суммарную скорость массового перехода жидкости в пар в единице объема, можно записать в виде

$$m_{fg} = \frac{3r_g \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (5)$$

Обобщая формулу (5) на случай процесса конденсации пара можем записать

$$m_{fg} = F \frac{3r_g \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \text{sign}(p_v - p), \quad (6)$$

где F – эмпирический коэффициент, отвечающий за скорость конденсации и парообразования конкретной жидкости, также учитывающий то, что процесс конденсации проходит значительно медленнее.

В общем случае при компьютерном моделировании радиус пузырька R_B заменяют радиусом ядра кавитационного зародыша R_{nuc} . Однако, для случая парообразования уравнение (6) следует модернизировать с учетом того, что в жидкости всегда остается некоторый относительный объем пара r_{nuc} , который не конденсируется. Тогда уравнение (6) примет вид

$$m_{fg} = F \frac{3r_{nuc}(1-r_g)\rho_g}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \text{sign}(p_v - p). \quad (7)$$

Значительным недостатком при моделировании течения в трактах шнекоцентробежного насоса с существующими кавитационными моделями и моделью Релея-Плессета в частности, является нехватка эмпирических данных, на которых можно проводить верификацию этих кавитационных моделей в криогенных жидкостях. Для модели Релея-Плессета ввиду обилия экспериментальных данных по гидравлическим испытаниям получены константы для воды: диаметр зародыша $R_{nuc} = 10^{-6}$ м, неконденсирующийся остаток пара $r_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$, коэффициент парообразования $F_{vap} = 50$, коэффициент конденсации $F_{cond} = 0,01$.

В АО КБХА была проведена серия компьютерных экспериментов в программном комплексе ANSYS CFX, целью которых была верификация модели Релея-Плессета для исследования течения в шнеке кислородного насоса. Был исследован шнек штатной конструкции и на основе анализа полученных данных изучена возможность перепрофилирования шнека.

Исследуемый штатный шнек, представленный на рис. 1, профилировался с целью обеспечить повышение антикавитационных качеств насоса при повышенных относительных расходах Q/n , характерных для режима запуска двигателя. В то же время критический кавитационный запас насоса на номинальном Q/n с данным шнеком лежит на верхней границе допустимых по техническому заданию значений.

В ANSYS CFX моделировалось течение в одном межлопаточном канале шнека. Была построена сетка, состоящая из 2 млн. элементов и 0,7 млн. узлов. В качестве основных элементов выбирались тетраэдры, так как построение структурированной сетки невозможно из-за

наклона входной кромки в меридиональном сечении. Сетка включает 10 слоев призматических элементов, позволяющих корректно разрешить течение в пограничном слое и обеспечивающих значение параметра Y^+ не более 50. Математическая модель построена на основе осредненных уравнений Рейнольдса с использованием модели турбулентности переноса сдвиговых напряжений [9].

Задача решалась при следующих граничных условиях: на входе в расчетную область задавалось полное давление, которое в процессе решения снижалось, имитируя проведение срывных кавитационных испытаний; на выходе задавался фиксированный массовый расход при первой серии расчетов равный номинальному, при второй в 1,5 раза выше номинального.

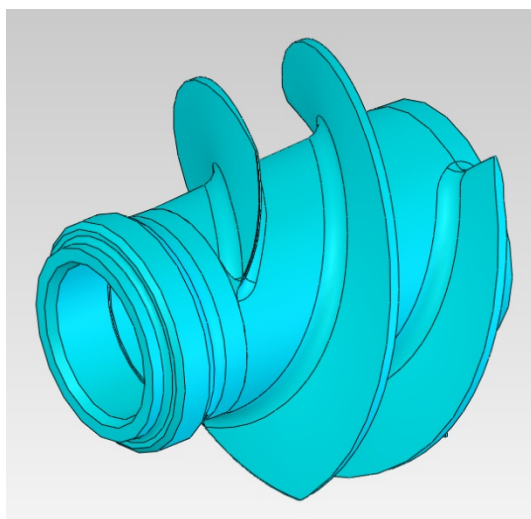
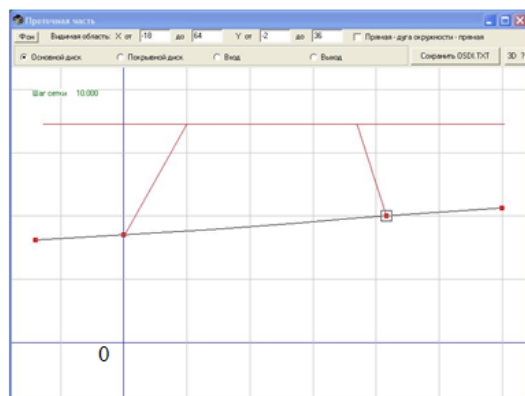


Рис. 1. Геометрическая модель шнека

Параметры кислорода [10] и выбранные константы для модели Релея-Плессета с учетом ее верификации представлены в таблице.

Параметры кавитационной модели

Параметр	Значение
Полное давление на входе, бар	От 20 до 5
Температура кислорода, К	92,8
Давление насыщенного пара, бар	1,32
Динамическая вязкость жидкого кислорода, кг/м·с	$1,85 \cdot 10^{-4}$
Плотность жидкого кислорода, кг/м ³	1124,3
Динамическая вязкость газообразного кислорода, кг/м·с	$6,9 \cdot 10^{-7}$
Плотность газообразного кислорода, кг/м ³	5,7
Неконденсирующийся остаток пара	10^{-4}
Средний диаметр кавитационного зародыша, мм	0,01
Коэффициент конденсации	0,01
Коэффициент парообразования	50

По результатам расчетов построены зависимости относительного напора, КПД и относительного объема каверн для исследуемых массовых расходов (рис. 2 и 3).

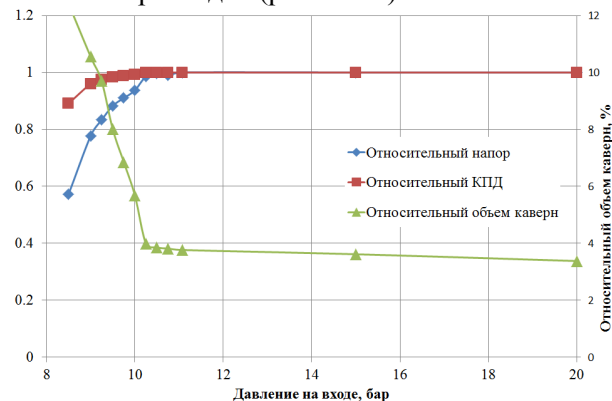


Рис. 2. Относительное снижение энергетических параметров шнека на номинальном расходе

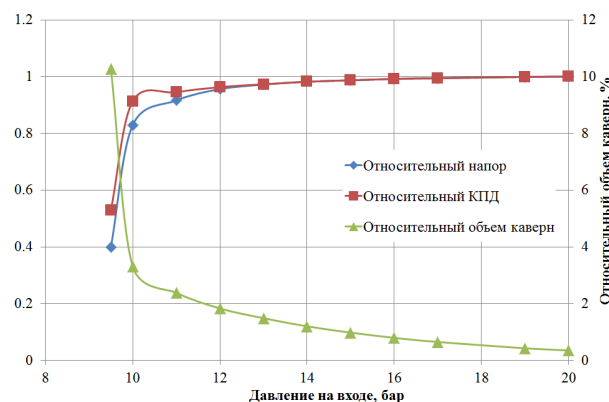


Рис. 3. Относительное снижение энергетических параметров шнека на повышенном расходе

По результатам компьютерного эксперимента получено качественное совпадение характера энергетических параметров шнека с результатами натурных испытаний: удачно смоделирован эффект кавитационной разгрузки шнека, где напор снижается быстрее, чем КПД. Данным эффектом объясняется снижение мощ-

ности насоса при кавитации. При наличии турбинного привода насоса происходит увеличение частоты вращения ротора установки, компенсирующее уменьшающуюся мощность.

Следует отметить, что разница в темпе снижения относительных параметров явно связана с объемом кавитационных каверн. Чем объем каверн больше, тем больше разница в темпе снижения относительного напора по сравнению с относительным КПД.

Для повышенного массового расхода каверны имели малый объем, а темп снижения КПД и напора практически совпадал. При приближении к точке срыва объем каверн начал быстро расти и, соответственно, увеличилась разница между относительным напором и относительным КПД.

При номинальном расходе резкое снижение напора возникает при достижении кавитационной каверной выходной кромки шнека. Далее каверна с понижением входного давления начинает расширяться и перекрывать межлопаточный канал шнека.

На повышенном расходе срыв шнека происходит резче. С понижением входного давления кавитационная каверна начинает перекрывать входное сечение в межлопаточный канал шнека, нарушается процесс торможения потока в межлопаточном канале в относительном движении, что является необходимым условием для создания напора и происходит почти двукратное его снижение. Дальнейшее понижение входного давления приводит к скачкообразному росту объема каверны и быстрому перекрытию входного сечения межлопаточного канала.

Однако, если рассматривать не отдельный осевой насос, а сочетание осевой и центробежной ступеней, характерное для тематики ЖРД, то даже в случае срыва шнека, напор насоса восстанавливается за счет работы крыльчатки.

Для исследования совместной работы было проведено моделирование одного межлопаточного канала шнека в сочетании с тремя каналами центробежного колеса. Рассмотрено два варианта шнека: шнек штатной конструкции и модернизированный шнек с повышенным напором. Геометрическая модель проточной части показана на рис. 4.

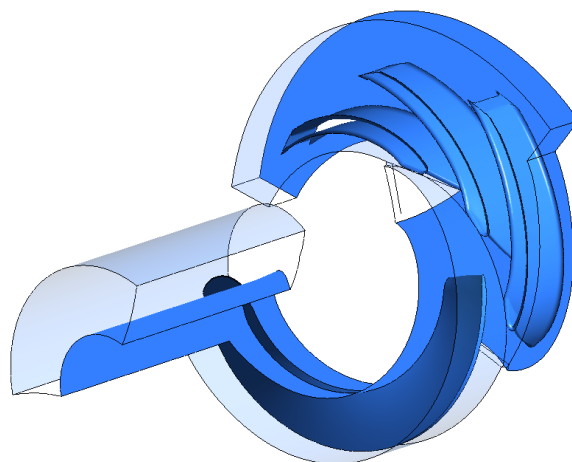


Рис. 4. Геометрическая модель проточной части шнеко-центробежного насоса

Анализ результатов моделирования показывает улучшение антикавитационных качеств насоса, как на номинальном расходе, так и на повышенном расходе. При входном давлении 6,5 бар на номинальном режиме со штатным шнеком зафиксировано снижение напора насоса на 6,23%. С новым шнеком давление снизилось на 4,06%. Объем кавитационных каверн уменьшился с 10013 мм³ до 5205 мм³. Кавитационные зоны показаны на рис. 5 и 6.

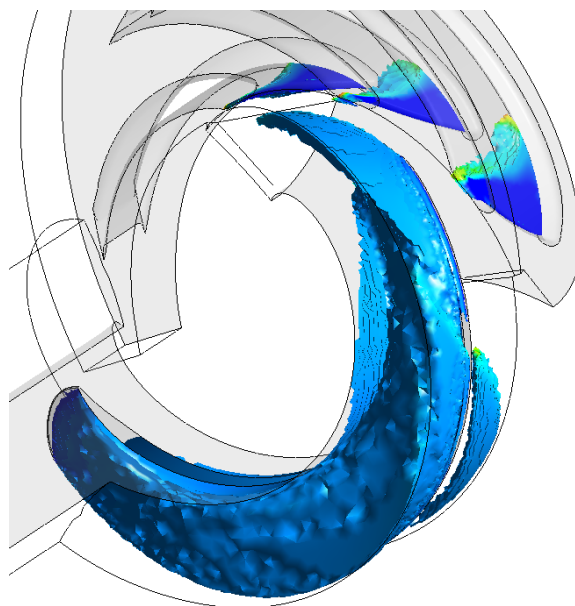


Рис. 5. Кавитационные зоны на номинальном массовом расходе со шнеком штатной конструкции

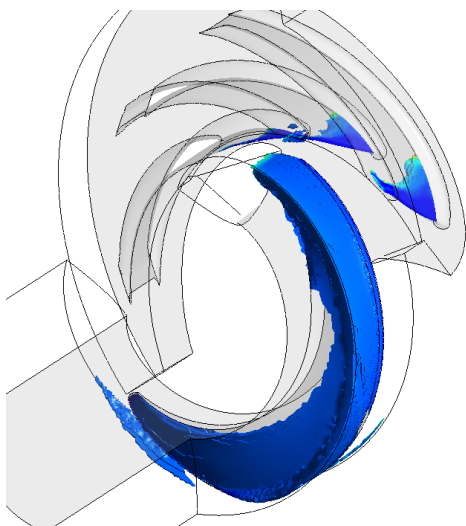


Рис. 6. Кавитационные зоны на номинальном массовом расходе со шнеком новой конструкции

При повышенном массовом расходе при входном давлении 19 бар со штатным шнеком зафиксировано снижение напора насоса на 5,9%. С новым шнеком давление снизилось на 4,07%. Объем кавитационных каверн уменьшился с 758 мм³ до 222 мм³.

Срыв насоса на номинальном массовом расходе происходит за счет срыва шнека. В шнеке образуются значительные зоны кавитации, напор шнека снижается, что в свою очередь приводит к снижению напора насоса в целом.

Анализ результатов моделирования показывает, что с новым шнеком критический кавитационный запас на номинальном режиме работы насоса может быть снижен на 5-10 м.

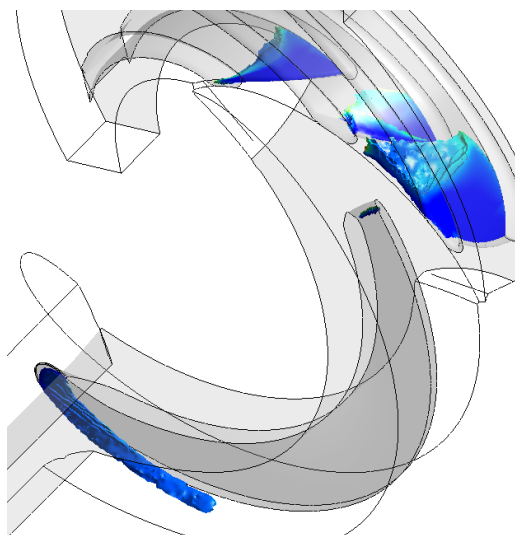


Рис. 7. Кавитационные зоны на повышенном массовом расходе со шнеком штатной конструкции

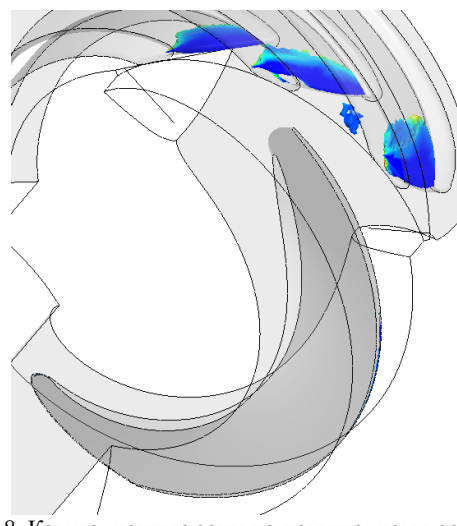


Рис. 8. Кавитационные зоны на повышенном массовом расходе со шнеком новой конструкции

На повышенном массовом расходе срыв насоса происходит за счет недостаточной напорности шнека. Зоны кавитации показаны на рис. 7 и 8. При входном давлении 19 бар не происходит снижения напора шнека. Кавитационные каверны образуются на входной кромке с всасывающей стороны лопатки центробежного колеса, что и приводит к снижению давления на выходе из насоса. Увеличение напора шнека на режиме повышенных Q/p позволяет повысить кавитационную стойкость насоса на данных режимах.

В заключение следует сказать, что получение кривых, описывающих кавитационную разгрузку насоса, является важной научно-практической задачей, которую на данный момент стало возможно решать с помощью средств вычислительной гидрогазодинамики. Повышение точности моделирования кавитационного течения в криогенных жидкостях может быть достигнуто при учете тепловых явлений (локальное понижение давления насыщенного пара) и учете снижения скорости звука в двухфазной среде, а также дальнейшим уточнением коэффициентов среды, входящих в модель Релея-Плессета.

Литература

1. Овсянников Б.В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / Б.В. Овсянников, Б.И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1986. 376 с.
2. Натанзон М.С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / М.С. Натанзон, В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев. – М.: Машиностроение, 1977. 352 с.
3. Стирлинг Л.Б. Кавитация в лопастных насосах. / Л.Б. Стирлинг, А.Дж. Акроста // Труды американского общества инженеров-механиков. Техническая механика. Ч. II. – М.: ИЛ, 1962. №3. С. 29-41
4. Acosta A.J. Experimental Study of Cavitating Inducers. / A.J. Acosta // Second Symposium of Naval Hydrodynamics – Washington, D.C., 1958, pp. 533-557

5. Ross C.C. Some Aspects of High-Suction Specific-Speed Pump Inducers. / C.C. Ross, G. Banerian // ASME, Vol. 78 – 1956, pp. 1715-1721

6. Моделирование срывной кавитационной кривой в бустерном турбонасосном агрегате ЖРД. / И.С. Казеннов, Ю.И. Каналин, Н.П. Поletaев, И.А. Чернышева // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко. – М., 2014. С. 110-130

7. Numerical and Experimental Investigations of the Cavitating Behavior of an Inducer // F. Bakir, R. Rey, A.G.

Gerber, T. Belamri, B. Hutchinson // International Journal Rotating Machinery, Vol. 10, pp. 15-25, 2004.

8. Brennen C.E. Cavitation and Bubble Dynamics / C.E. Brennen – Oxford University Press, 1995, 456 p.

9. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. / F.R. Menter // AIAA-Journal, Vol. 32(8), 1994, pp. 1598 - 1605

10. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. 720 с.

Воронежский государственный технический университет

Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж

Краснодарское «Военно-воздушное авиационное училище летчиков», г. Борисоглебск

APPLICATION OF RAYLEIGH-PLESSET CAVITATION MODEL FOR THE ANALYSIS OF CRYOGENIC FLUID FLOW WITHIN THE PATHS OF TWO STAGE PUMP

A.A. Afanasyev¹, Y.V. Demyanenko², A.N. Popkov³

¹Ph.D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, OSC Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation

e-mail: afanasyev.alex.alex@gmail.com

²Ph.D., Full Professor, Voronezh State Technical University, Chief expert on supply units, OSC Konstruktorskoe Buro Khimavtomatiki, Voronezh, Russian Federation

e-mail: cadb@mail.ru

³Tutor, Krasnodar higher military aviation school for pilots, Borisoglebsk, Russian Federation, e-mail: popkov.group@yandex.ru

The article reviews the modeling of the flow of cryogenic liquid in the paths of a screw-centrifugal pump of a liquid rocket engine. The general description of the effect of cavitation pump failure is given. The method of computational fluid dynamics - ANSYS CFX package is chosen as a research tool. In the process of simulation, the Rayleigh-Plesset cavitation model is used. The relations of this model are derived from mechanical considerations without taking thermal phenomena into account. It is verified for liquid oxygen.

In addition, the article gives recommendations for the construction of a grid and the decision-making choices of boundary conditions for similar problems. Simulation was carried out for a separately standing auger and auger combined with a centrifugal wheel. The processes of cavitation failure and the effect of cavitation discharge are investigated for both systems. Interdependences of the cavitation caverns on the inlet pressure in the auger are illustrated. At cavitation unloading, the relationship between the difference in the rate of decrease of the relative parameters and the volume of the cavitation caverns is mentioned. Dependences of relative energy parameters at nominal and increased mass expenditures are reviewed. The mechanism of pump failure at increased mass flow rates is described

Key words: liquid rocket engine, feed units, cavitation, computer simulation

References

1. Ovsyannikov B.V., Borovskiy B.I., "Theory and calculations for the liquid rocket engines supply units" ("Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley"), (1986) 376.
2. Natanzon M.S., Pilipenko V.V., Zadoncev V.A., "Cavitation oscillation and hydro-system dynamics" ("Kavitacionnye avtokolebaniya i dinamika gidrosistem"), Mechanical engineering (1977): 352.
3. Stirling L.B., Acosta A.J., "Cavitation in a vane pump" ("Kavitaciya v lopastnykh nasosakh"), ASME. Technical mechanics. Foreign literature 3 (1962): 29-41.
4. Acosta A.J., "Experimental Study of Cavitating Inducers," Second Symposium of Naval Hydrodynamics – Washington, D.C. (1958): 533-557.
5. Ross C.C., Baneria G., "Some Aspects of High-Suction Specific-Speed Pump Inducers," ASME 78 (1956): 1715-172.
6. Kazennov I.S., Kanalin Yu.I., Poletayev N.P., Chernysheva I.A., "Cavitation breakdown curve modeling in LRE buster turbinal pump" ("Modelirovaniye sryvnoy kavitacionnoy krivoy v busterom turbonasosnom aggregate"), Writings of NPO Energomash (2014): 110-130.
7. Bakir F., Rey R., Gerber A.G., Belamri T., Hutchinson B., "Numerical and Experimental Investigations of the Cavitating Behavior of an Inducer", International Journal Rotating Machinery 10, (2004): 15-25.
8. Brennen C.E., "Cavitation and Bubble Dynamics," Oxford University Press (1995): 456.
9. Menter F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA-Journal 32-8 (1994): 1598 - 160
10. Vargaftic N.B. "Handbook on thermo-physical properties of gases and liquids" ("Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey"), Science (1972): 720.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СЕГМЕНТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

А.М. Литвиненко, А.Б. Кирилов, М.А. Чурсин

В статье рассматривается математическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности регулирования возбуждения синхронных генераторов в сегментном исполнении путем преднамеренного изменения воздушного зазора отдельных модулей активного сегмента, например, перемещение модулей статора относительно роторных элементов.

Таким образом, обосновывается введение нового, ранее неизвестного, канала регулирования синхронных машин с постоянными магнитами, что придает системе управления адаптивные свойства, обеспечивает автоматическое управление.

Это достигается путем расчета конформного отображения поля в зоне рабочего воздушного зазора, что позволяет найти аналитические зависимости, подтверждаемые экспериментом на макете магнитной системы сегментного ветроэлектродвигателя. В частности, приведены кривые, характеризующие найденные зависимости, подтверждающие исходные теоретические положения.

Таким образом, в результате исследования фактически доказана возможность введения дополнительного воздействия на данный объект, что дает синергетический эффект: с одной стороны, появляется возможность при небольшой скорости ветра уменьшить противодействующий момент на ветроколесо при постоянной нагрузке низкого уровня, а с другой стороны, при интенсивном ветре существенно повысить энергоотдачу агрегата, что в конечном итоге улучшает эксплуатационные характеристики. Приведена структурная схема системы управления, построенного на принципах экстремального управления. В качестве экстремальной (оптимальной) характеристики выступают или угловая характеристика синхронного генератора, или U-образная. Отличие будет только в знаке. В случае угловой характеристики система с помощью сигнум-реле и коммутатора будет осуществлять управление исполнительным механизмом, регулирующим зазор в заранее установленных пределах

Ключевые слова: автоматизация, адаптация, возбуждение сегментных генераторов

Адаптивное управление подразумевает обычно изменение структуры (или параметров) регулятора, или адаптацию объекта и изменяется внешним возбуждением. Целью настоящего исследования является изменение вопроса о возможности регулирования напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов в сегментном исполнении путем изменения воздушного зазора. Такие генераторы находят применение в составе генераторных систем возобновляемых источников энергии, например, ветроэнергетических станций (ВЭС) малой мощности. До настоящего времени при исследовании синхронных машин предлагалось лишь изменение зазора периодически в тангенциальном направлении, что вызывает в любой машине зубцовые пульсации. В машине сегментного исполнения имеется возможность с помощью исполнительного механизма малой мощности осуществлять радиальное изменение зазора, что, при использовании постоянных магнитов, эквивалентно регулированию ветроэлектрической станции малой мощности, осуществляющей адаптацию как к режимам нагрузки, так и к изменениям частоты вращения вследствие влияния внешних факторов.

Рассмотрим способ построения поля в не прямом зазоре [1], который основан на расчете конформного отображения поля в зоне торца при скругленном угле (см. рис. 1).

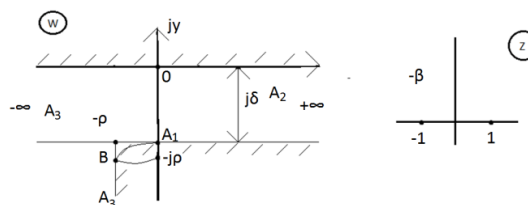


Рис. 1. Конформные преобразования области W в Z

При этом

$$W = C \int_0^z \frac{\sqrt{z} + \gamma\sqrt{z} + \beta}{1 - z} dz$$

Для переходов

$$z = -\beta \rightarrow B = -\rho - j\rho$$

Получается

$$W = \frac{2\delta}{\pi} \times \frac{1}{1+\gamma\sqrt{1+\beta}} \left[\operatorname{arth}\sqrt{z} - \sqrt{z} + \gamma \left(\sqrt{1+\beta} \times \operatorname{arth}\sqrt{\frac{z+\beta}{1+\beta}} - \sqrt{z+\beta} + \sqrt{\beta} - \sqrt{1+\rho} \times \operatorname{arth}\sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} \right) \right],$$

где γ - коэффициент, получаемый при переходе через A_2 , вместе с тем $\Delta z = 1$, а W при приращении $j\sigma$ получает выражение:

Литвиненко Александр Михайлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru
Кирилов Андрей Бориславович – ВГТУ, аспирант, e-mail: Andrei7evn.com
Чурсин Михаил Александрович – РЭУ им. Г. В. Плеханова (ВФ), канд. техн. наук, доцент, e-mail: churc1951@yandex.ru

$$C\pi(1 + \gamma\sqrt{1 + \beta}) = \delta,$$

$$\text{откуда } C = \frac{\delta}{\pi(1 + \gamma\sqrt{1 + \beta})}$$

В [1-6] указывает, что учет скругления целесообразен при приближении отношения y/δ к единице, приведен график изменения индукции при различных параметрах скругления в относительных единицах (см. рис.2), позволяющий сделать оценку изменения индукции.

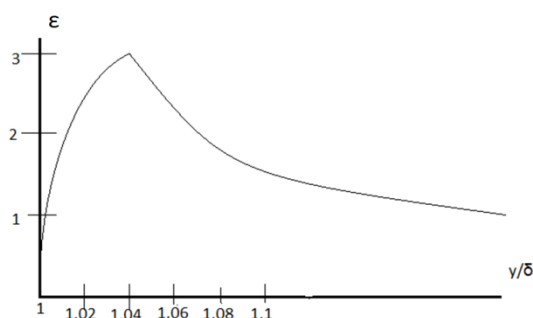


Рис. 2. Изменение индукции в зависимости от отношения y/δ для параметра скругления $\beta=0,7$

В [2] приводится формула для расчета магнитной проводимости G между торцевой поверхностью и наклонной плоскостью.

$$G = \frac{M_0 b R_0}{\delta - \Delta} \ln \frac{R_0 + \frac{a}{2} + \frac{\Delta R_0}{\delta - \Delta}}{R_0 - \frac{a}{2} + \frac{\Delta R_0}{\delta - \Delta}}$$

Обозначения приведены на рис.3.

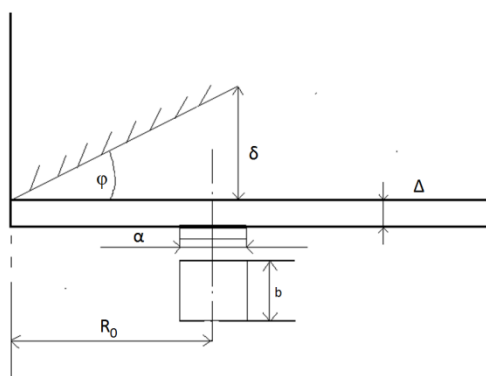


Рис. 3. К определению магнитной проводимости

Представляя φ как:

$$\varphi = \arctg \frac{R_0}{R_0} = \arctg \frac{R_0}{\delta - \Delta}$$

Преобразуем исходную формулу:

$$G = \frac{M_0 b}{\arctg \varphi} \ln \frac{R_0 + \frac{a}{2} + \arctg \varphi}{R_0 - \frac{a}{2} + \arctg \varphi},$$

которая позволяет аналитически найти зависимость проводимости от φ .

Таким образом, известные в [3] процессы регулирования напряжения генератора можно дополнить рассмотренным методом, включая построение регулируемых характеристик [4]. Рассмотренный метод находится в ключе известных [5] вариаций геометрии воздушного зазора, когда выбираются разные диаметры ротора и статора, или спрямляются по касательной краевые участки полюсов. Для электрических аппаратов, в частности, двухобмоточных клапанных реле, согласно [6] также приводятся выражения для магнитного сопротивления R рабочего зазора

$$R = R(\varphi)$$

где φ - угол поворота клапана.

Различные варианты конструктивной реализации изменения зазора приведены в [8-23].

Для доказательства вышеизложенных положений были поставлены в соответствие с рекомендациями [7] эксперименты на макете магнитной системы осевого типа, длина сегмента ротора 135 мм, радиус ротора 500 мм, длина зубца (паза) – 15 мм, высота зубца (глубина паза) – 8 мм, спинка – 12 мм. Толщина каждого из двух наборов – 5 мм, размеры постоянных магнитов, размещённых между наборами – 8*6*17 мм. Соответствующий статор набран из магнитопроводов и рабочих катушек реле клапанного типа в количестве 3 шт. Размеры магнитопровода – 37*38*55 мм. Диаметр полюсного наконечника катушки – 16 мм, его высота – 37 мм. Диапазон изменения зазора – 3÷6 мм. Размеры датчика Холла из германия с удельным сопротивлением $\rho = 1,4 \text{ ом} \cdot \text{см}$ составляли 1*2*9 мм. Перед экспериментом производилась тарировка. Датчик был наклеен на подложку из стеклотекстолита толщиной 0,8 мм, шириной 12 мм и длиной 160 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 4.

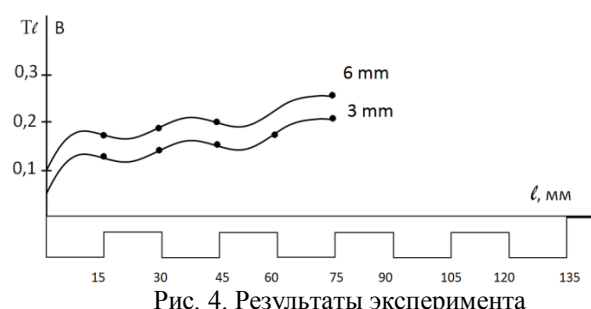


Рис. 4. Результаты эксперимента

Верхняя кривая приведена для магнита из самарий – кобальтового материала, нижняя – для феррита НМ.

С точки зрения теории управления данный объект является однопараметрическим, к нему можно применить принципы экстремального

управления, например, с помощью коммутации поперечных реверсов с запоминанием экстремума.

Поведение системы управления можно рассмотреть на примере угловой характеристики генератора, хотя возможно и использование U - образной характеристики (отличие будет только в знаке). Предположим, что начальное состояние характеризуется точкой M_1 . Из-за действия возмущения, смещающего характеристику вверх, выходная переменная будет возрастать (движение от M_1 к M_2), сигнала с сигнум - реле не поступает. Если же действие возмущения прекращается, то через некоторый промежуток коммутатор осуществит реверс. В результате управляющее воздействие изменяется вблизи $\beta^{(1)}$ - см. рис. 5, где обозначено X- нагрузка, β - угол, нагрузки.

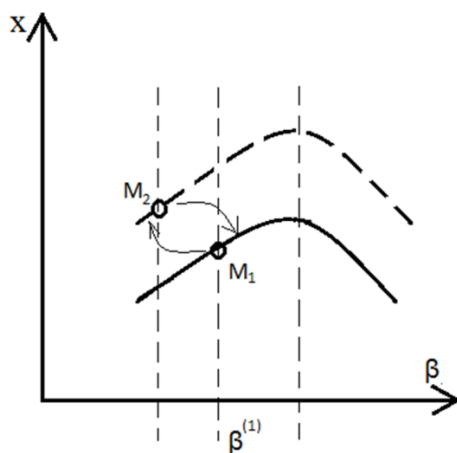


Рис. 5. К объяснению принципа действия адаптивной экстремальной системы управления состоянием генератора

Структурная схема показана на рис.6, где Г - генератор, ИМ - исполнительный механизм, осуществляющий поворот сегмента, ЗУ - запоминающее устройство, ЭС - элемент сравнения, СР-сигнум - реле.

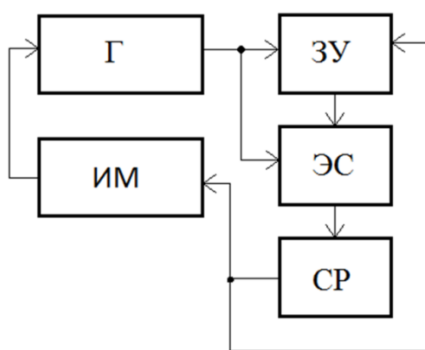


Рис. 6. Структурная схема

Таким образом, экспериментально доказана возможность регулирования поля постоянных магнитов для изменения возбуждения генераторов.

Заключение

Регулирование описанным способом интенсивности поля синхронных генераторов открывает возможность построения адаптивной системы управления генератором ветроэлектрической станции малой мощности, осуществляющей адаптацию как к режимам нагрузки, так и к изменениям частоты вращения вследствие влияния внешних факторов.

Литература

1. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах/В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 25с.
2. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты/А.Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248с.
3. Липай Б.Р. Электромеханические системы: учеб. пособие /Б.Р. Липай. – М.: Изд. Дом МЭН, 2011. – 351с.
4. Гольдберг О.Д. Электромеханика: учебник для вузов/О.Д. Гольдберг. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 512с.
5. Сугробов А.М. Проектирование электрических машиноавтомонных объектов: учеб. пособие / А.М. Сугробов. – М.: Изд. Дом МЭН, 2012. – 304с.
6. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей/Р.В. Фильц. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208с.
7. Пат. 2204052 RU, МПК 9/00 Ветроагрегат / А.М. Литвиненко (РФ), Воронежский государственный технический университет (РФ). 2204052 C1; Заявлено 31.10.2001. Оpubл. 2003. Бюл. №13.
8. Пат. 2204734 RU, МПК 9/00 Статор ветроэлектродгенератора [Текст]/ Литвиненко А.М. (РФ); заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - 2204734 C1; заявл. 31.10.2001. опубл. 2003. Бюл. №14.
9. Пат. 2211366 RU, МПК 1/06 Ветроколесо / А.М. Литвиненко (РФ), Воронежский государственный технический университет (РФ). 2211366 C1; Заявлено 14.02.2002. Оpubл. 2003. Бюл. №24.
10. Пат. 2211949 RU, МПК 9/00 Ветроэлектродгенератор / А.М. Литвиненко (РФ), Воронежский государственный технический университет (РФ). 2211949 C2; Заявлено 31.10.2001. Оpubл. 2003. Бюл. №25
11. Пат. 2211948 RU, МПК 9/00 Контрроторный ветроэлектродгенератор / А.М. Литвиненко (РФ), Воронежский государственный технический университет (РФ). 2211948 C2; Заявлено 31.10.2001. Оpubл. 2003. Бюл. №25
12. Пат. 2211951 RU, МПК 9/00 Ветроэлектродгенераторная установка / А.М. Литвиненко (РФ), Воронежский государственный технический университет (РФ). 2211951 C2; Заявлено 27.12.2001. Оpubл. 2003. Бюл. №25
13. Пат. 2187019 RU, МПК F 03 D 5/04. Ветроэнергетическая установка / А.М. Литвиненко (РФ), Воронеж. гос.техн.ун-т (РФ) 2001101581/06; Заявлено 16.01.2001; Оpubл. 2002. Бюл. №22.
14. А.с. №1409774 СССР, МКИ4 F 03 D 5/04. Ветроэнергетическая установка / А.М. Литвиненко (СССР). №4161164/25-06. Заявлено 08.12.86; Оpubл. 1988. Бюл №26
15. Пат. 2187019 RU МПК F 03 D 5/04 Ветроэнергетическая установка / А.М. Литвиненко (РФ),

Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2001101581/06; Заявлено 16.01.2001; Опул. 2002. Бюл. №22

16. Пат. 2208700 RU, МПК F 03 D 5/04 Безредукторный ветроагрегат / А.М. Литвиненко (РФ), Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2001129401/06; Б.и. №20, 2003 г.

17. Пат. 2272174 RU, МПК F 03 D 9/00 (2006.1) Система управления ветроэлектроагрегатом / А.М. Литвиненко (РФ) Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2004128524/06; Б.и. №8, 2004 г.

18. Пат. 2569467 RU, МПК F 03 D 3/00 (2006.1) Статор электрогенератора / А.М. Литвиненко (РФ), Т.А. Казак (РФ) Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2013119143/06; Б.и. №33, 2015 г.

19. Пат. 2569468 RU, МПК F 03 D 3/00 (2006.1) Вертикальный ветродвигатель / А.М. Литвиненко (РФ), Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2013146915/06; Б.и. №33, 2015 г.

20. Пат. 2569469 RU, МПК F 03 D 3/00 (2006.1) Роторный ветродвигатель / А.М. Литвиненко (РФ), Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2013146917/06; Б.и. №33, 2015 г.

21. Пат. 2571996 RU, МПК F 03 D 9/00, F 03 D 11/00 (2006.1) Статор сегментного генератора / А.М. Литвиненко (РФ), Воронеж. Гос. Техн. Ун-т (РФ). 2013150777/06; Опул. Б.И. №36, 2015 г.

Воронежский государственный технический университет

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Воронежский филиал

AUTOMATIC ADAPTIVE DRIVE CONTROL OVER EXCITATION OF SEGMENT GENERATORS BY AIR GAP CHANGE

A.M. Litvinenko¹, A.B. Kirilov², M.A. Chursin³

¹Ph.D., Full Professor, Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru

²Graduate Student, Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: Andrei7evn.com

³Ph.D, Associate Professor, REU them. G.In. Plekhanov, Voronezh branch, Voronezh, Russian Federation
e-mail: churc1951@yandex.ru

The mathematical basis and experimental confirmation of the possibility of controlling the excitation of synchronous generators in segment execution by deliberately changing the air gap of individual modules of the active segment, (for example, moving the stator modules relative to the rotor elements), are reviewed in the article. Thus, the introduction of a new, previously unknown, channel for the regulation of synchronous machines with permanent magnets is justified, which gives the control system adaptive properties and ensures automatic control. This is being achieved by calculating the conformal mapping of the field in the working air gap zone, which allows us to find the analytical dependencies confirmed by experiment on the model of the magnetic system of the segment wind-generated generator. In particular, the curves characterizing the dependences confirm the initial theoretical position. Thus, as a result of the study, the possibility of introducing an additional impact on this object has actually been proved, which gives a synergistic effect: on the one hand, it becomes possible to reduce the counteracting moment on the windwheel at a constant low level load, with a small wind speed, and on the other hand, with an intense wind the energy output of the unit significantly increases, which ultimately improves performance. The structural scheme of a control system based on the principles of extreme control is given. As an extreme (optimal) characteristic, either the angular characteristic of the synchronous generator or the U-shaped one is either. The difference will be only in the sign. In the case of an angular characteristic, the system will use the "Signum Relay" and the "Switch" options to control the actuator that controls the gap in predetermined limits

Key words: automation, adaptation, excitation of segment generators

References

1. Dombrovskij V.V., "Handbook on the calculation of the electromagnetic field in electrical devices" ("Spravochnoe posobie po raschetu elektromagnitnogo polja v elektricheskikh mashinakh"), Energoatomisdat (1983): 25.
2. Slivinskaja A.G., "Electromagnets and permanent magnets" ("Elektromagnity i postojannye magnity"), Energy, (1972): 248.
3. Lipaj B.R., "Tutorial on electromechanical systems: a tutorial" ("Elektromehaniicheskie sistemy: uchebnoe posobie"), Publishing House MEN (2011): 351.
4. Goldberg O.D., "Electro-mechanics: textbook for universities" ("Jelektromehanika: uchebnik dlja vuzov"), University Center "Academy (2007): 512.
5. Sugrobov A.M., "Tutorial on designing of electrical autonomous devices" ("Proektirovanie jelektricheskikh mashinavtonomnykh ob'ektov: uchebnoeposobie"), Publishing House MEN 304 (2012): 304.
6. Fil'c R.V., "Mathematical basics of the theory of electromechanical transducers" ("Matematicheskie osnovy teorii jelektromehaniicheskikh preobrazovatelej"), Kiev:NaukovaDumka, (1979): 208.
7. Litvinenko A.M., "(RF), Patent 2204052 RU, IPC 9/00 - windmill" "Patent 2204052 RU, MPK 9/00 Vetroagregat), Voronezh State Technical University 13 (2003).
8. A.M. Litvinenko "Patent 2204734 RU, IPC 9/00 Stator electrical windmill generator" ("Patent 2204734 RU, MPK 9/00 Stator vetrojelektrogeneratora"), Voronezh State Technical University (2003)

9. Litvinenko A.M., "Patent 2211366 RU, IPC 1/06 Wind wheel" ("Patent 2211366 RU, MPK 1/06 Vetrokoleso"), Voronezh State Technical University (2003).
10. Litvinenko A.M., "Patent 2211949 RU, IPC 9/00 Wind power generator" ("Patent 2211949 RU, MPK 9/00 Vetrojelektrogenerator"), Voronezh State Technical University (2003).
11. Litvinenko A.M., "Patent 2211948 RU, 9/00 Counter-rotary wind generator" ("Patent 2211948 RU, MPK 9/00 Konttrrotornyj vetrojelektrogenerator"), Voronezh State Technical University (2003).
12. Litvinenko A.M., "Patent 2211951 RU, IPC 9/00 Wind power generating sets" ("Patent 2211951 RU, MPK 9/00 Vetrojelektrogeneratornaja ustanovka"), Voronezh State Technical University (2003).
13. Litvinenko A.M., "Patent 2187019 RU, IPC F 03 D 5/04. Wind energy installation" ("Patent 2187019 RU, MPK F 03 D 5/04. Vetrojenergoustanovka"), Voronezh State Technical University (2002).
14. Litvinenko A.M., "Patent №1409774 USSR MKI4 F 03 D 5/04. Wind Turbine" ("Patent №1409774 MKI4 F 03 D 5/04. Vetrojenergeticheskaja ustanovka"), Voronezh State Technical University (1988).
15. Litvinenko A.M., "Patent RU 2187019 IPC F 03 D 5/04 Wind Turbine" ("Patent 2187019 RU MPK F 03 D 5/04 Vetrojenergeticheskaja ustanovka"), Voronezh State Technical University (2002).
16. Litvinenko A.M., "Patent 2208700 RU, IPC F 03 D 5/04 gearless wind turbine" ("Patent 2208700 RU, MPK F 03 D 5/04 Bezreduktornyj vetroagregat"), Voronezh State Technical University (2003).
17. Litvinenko A.M., "Patent 2272174 RU, IPC F 03 D 9/00 (2006.1) The control system of wind electric unit" ("Patent 2272174 RU, MPK F 03 D 9/00 (2006.1) Sistema upravlenija vetrojelektroagregatom"), Voronezh State Technical University (2004).
18. Litvinenko A.M., "Patent 2569467 RU, IPC F 03 D 3/00 (2006.1) The stator of the electric generator" ("Patent 2569467 RU, MPK F 03 D 3/00 (2006.1) Stator elektrogenatora"), Voronezh State Technical University (2006).
19. Litvinenko A.M., "Patent 2569468 RU, IPC F 03 D 3/00 (2006.1) Vertical wind turbine" ("Patent 2569468 RU, MPK F 03 D 3/00 (2006.1) Vertikal'nyj vetrodvigatel"), Voronezh State Technical University (2015).
20. Litvinenko A.M., "Patent 2569469 RU, IPC F 03 D 3/00 (2006.1) rotary wind motor" ("Patent 2569469 RU, MPK F 03 D 3/00 (2006.1) Rotornyj vetrodvigatel"), Voronezh State Technical University (2015).
21. Litvinenko A.M., "Patent 2571996 RU, IPC F 03 D 9/00, F 03 D 11/00 (2006.1) The stator segment Generator" ("Patent 2571996 RU, MPK F 03 D 9/00, F 03 D 11/00 (2006.1) Stator segmentnogo generator"), Voronezh State Technical University (2015).

ГЕНЕРАТОР МОДУЛИРОВАННЫХ ПО ЧАСТОТЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ В СУБМИКРОННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ БАЗИСЕ

Е.Б. Барбарина, Д.В. Шеховцов, А.И. Мушта

Статья посвящена разработке генератора прямоугольных импульсов, модулированных по частоте, пригодного для реализации в интегральном исполнении с использованием топологических норм в субмикронном технологическом базисе. Архитектура генератора модулированных импульсов базируется на структуре асинхронного RS-триггера. Особенностью предлагаемого устройства является расширение функциональных возможностей стандартного асинхронного RS-триггера за счет применения оригинальных схемотехнических решений. Триггер в структуре генератора является формирователем прямоугольных импульсов. Это позволило исключить внешний формирователь меандра. В схему генератора введены две схемы задержки в цепи обратной связи RS-триггера, которые позволяют управлять временем прохождения сигнала. Управление осуществляется за счет использования внешнего генератора управляющего напряжения. Изменение амплитуды управляющего сигнала вызывает изменение сопротивления цепей обратной связи и времени прохождения сигнала. В работе проведены экспериментальные исследования реализации генератора прямоугольных импульсов. Для этого он был реализован в интегральном исполнении с применением стандартных базовых компонентов технологической библиотеки субмикронной технологии XH035 фабрики XFAB. Проведенное высокоточное моделирование устройства показало, что частота генератора может изменяться в достаточно широких пределах, от 47 до 94 МГц. В заключение исследований была разработана топология генератора с использованием базовых технологических элементов библиотеки

Ключевые слова: генератор прямоугольных импульсов, частотная модуляция, субмикронные проектные нормы, МОП-транзистор, логические элементы

Введение. Создание микроминиатюрных передающих устройств является важной научнотехнической задачей современной интегральной электроники. В зарубежной и отечественной литературе тема разработки интегральных приёмопередатчиков практически не освещена. Разработка подобных устройств позволит существенно упростить имеющиеся комплексы приемопередатчиков и разрабатывать новые компактные решения. Не менее важной задачей является задача создания генератора тактовых частот с настраиваемой частотой, использующихся для стробирования сложных микропроцессорных устройств. Использование указанного источника прямоугольных импульсов позволит гибко подстраивать частоту процессора под нужды системы, изменяя ее плавно в широком диапазоне.

Реализация задачи. Предлагаемый генератор модулированных по частоте прямоугольных импульсов может быть использован в радиопередающих устройствах, в измерительной и микропроцессорной технике в качестве источника частотно модулированных прямоугольных импульсов [1]. При этом его архитектура разрабатывалась с учетом реализации по КМОП-технологии в любом субмикронном или глубоко субмикронном технологическом базисе.

Разработка устройства проводилась в несколько этапов. Вначале была разработана архитектура генератора, с использованием прототипа устройства [2]. Структурная схема генератора представлена на рис. 1. Генератор содержит: внешний генератор управляющих прямоугольных сигналов 1; логические элементы 2ИЛИ-НЕ 2 и 3; цепи задержки прохождения сигналов 4 и 5; буферный логический элемент 6; состоящего из двух последовательно включенных инверторов генератор модулирующего напряжения 7, регулятора 8 цепей задержки прохождения сигналов 8.

Разработка функциональной реализации устройства производилась на основе структурной схемы генератора.

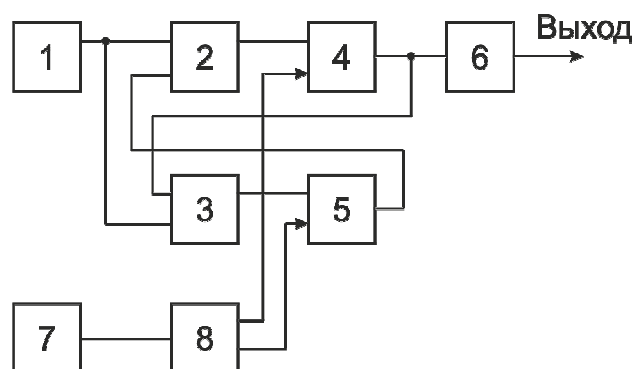


Рис. 1. Структурная схема генератора модулированных по частоте прямоугольных импульсов

Структура генератора позволяет использовать в качестве базовых логических элементов как 2ИЛИ-

Барбарина Елена Борисовна – ВГТУ, магистрант, e-mail: elena_fars@mail.ru, тел. 8-919-2420604

Шеховцов Дмитрий Витальевич – АО «НИИЭТ», начальник лаборатории проектирования процессоров ЦОС и систем на кристалле, канд. техн. наук, e-mail: wexwex@mail.ru, тел. 8-908-1326813

Мушта Александр Иванович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: micronano1441@yandex.ru, тел. 8-919-1856830

НЕ, так и 2ИЛИ-НЕ, а также транзисторы с различным типом канала в составе регулятора цепей задержки. Функциональная схема генератора представлена на рис. 2.

Генератор модулированных по частоте прямоугольных импульсов на логических элементах 2ИЛИ-НЕ с использованием МОП-транзисторов с каналом n-типа работает следующим образом. Первый П-образный RC-фильтр, составленный из конденсаторов 4, 6, резистора 5 и включенного параллельно резистору 5 МОП-транзистора 12 образует первую цепь задержки прохождения сигнала с выхода первого логического элемента 2ИЛИ-НЕ 2 на второй вход второго логического элемента 2ИЛИ-НЕ 3 со временем задержки $t_{\text{зад } 1}$, второй П-образный RC-фильтр, составленный из конденсаторов 7, 9, резистора 8 и включенного параллельно резистору 8 МОП-транзистора 13 образует вторую цепь задержки прохождения сигнала с выхода второго логического элемента 2ИЛИ-НЕ 3 на второй вход первого логического элемента 2ИЛИ-НЕ 2 с временем задержки $t_{\text{зад } 2}$. Цепь, состоящая из параллельно включенных МОП-транзистора 12 и резистора 5, характеризуется эквивалентной величиной сопротивления $R_{\text{экв } 1}$, цепь, состоящая из параллельно включенных МОП-транзистора 13 и резистора 8, характеризуется эквивалентной величиной сопротивления $R_{\text{экв } 2}$. В случае равенства нулю напряжения на выходе генератора модулирующего напряжения 14 сопротивления $R_{\text{экв } 1}$ и $R_{\text{экв } 2}$ представляют собой фиксированные величины, поэтому частотной модуляции генерируемой импульсной последовательности нет.

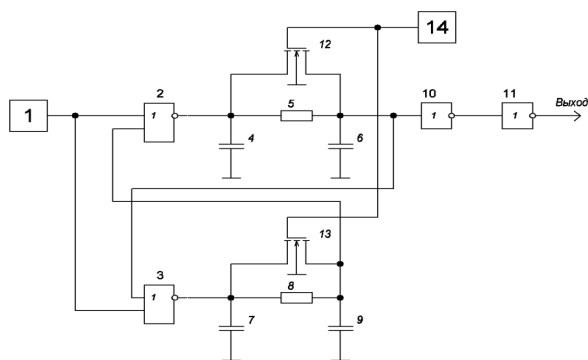


Рис. 2. Функциональная схема генератора модулированных по частоте прямоугольных импульсов на логических элементах 2ИЛИ-НЕ с использованием МОП-транзисторов с каналом n-типа

При подаче переменного напряжения с выхода генератора модулирующего напряжения 14 на затворы МОП-транзисторов 12 и 13 с каналами n-типа сопротивления каналов МОП-транзисторов 12 и 13 изменяются по закону модулирующего напряжения, поэтому изменяются эквивалентные сопротивления $R_{\text{экв } 1}$ и $R_{\text{экв } 2}$ П-образных RC-фильтров, это приводит к изменению времени задержки $t_{\text{зад } 1}$ прохождения сигнала с выхода первого логического элемента 2ИЛИ-НЕ 2 на второй вход второго логического элемента

2ИЛИ-НЕ 3 и времени задержки $t_{\text{зад } 2}$ прохождения сигнала с выхода второго логического элемента 2ИЛИ-НЕ 3 на второй вход первого логического элемента 2ИЛИ-НЕ 2 соответственно. В результате генерируемая импульсная последовательность модулируется по частоте. Частотная модуляция прямоугольных импульсов осуществляется за счет изменения величины сопротивления каналов первого 12 и второго 13 МОП-транзисторов с каналами n-типа под действием выходного напряжения генератора модулирующего напряжения 14 на затворы первого 12 и второго 13 МОП-транзисторов.

Вариация величин параметров элементов первой и второй цепей задержки прохождения сигналов под действием модулирующего напряжения позволяет изменять частоту генерации прямоугольных импульсов.

Проведено моделирование реализации генератора модулированных по частоте прямоугольных импульсов на логических элементах 2ИЛИ-НЕ с использованием МОП-транзисторов с каналом n-типа. Возрастание амплитуды напряжения на выходе генератора 14 приводит к уменьшению сопротивления каналов n-типа, вследствие чего уменьшается сопротивление $R_{\text{экв } 1} = R_{\text{экв } 2}$, поэтому время прохождения сигналов с выхода первого П-образного RC-фильтра на второй вход второго логического элемента 2ИЛИ-НЕ 3 и с выхода второго П-образного RC-фильтра на второй вход первого логического элемента 2ИЛИ-НЕ 2 уменьшается. Это влечет за собой рост частоты генерируемых прямоугольных импульсов. Уменьшение амплитуды напряжения на выходе генератора приводит к снижению частоты генерируемой импульсной последовательности за счет увеличения сопротивления каналов МОП-транзисторов, приводящего к росту эквивалентного сопротивления $R_{\text{экв } 1} = R_{\text{экв } 2}$. Временная диаграмма модулированных по частоте генерируемых прямоугольных импульсов на логических элементах 2ИЛИ-НЕ при использовании МОП-транзисторов с каналом n-типа приведена на рис. 3.

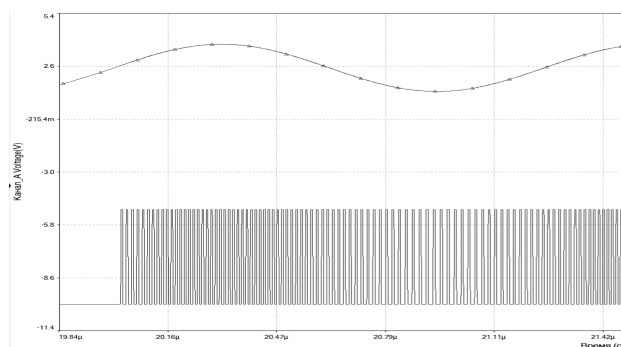


Рис. 3. Осциллограмма выходного сигнала генератора модулированных по частоте прямоугольных импульсов на логических элементах 2ИЛИ-НЕ при использовании МОП-транзисторов с каналом n-типа

В соответствии с рекомендациями, изложенными в [3] была разработана топология генера-

тора (рис. 4) с использованием базовых библиотечных компонентов процесса ХН035.

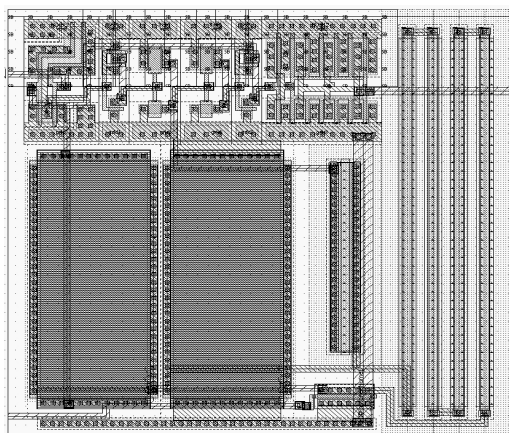


Рис. 4. Топология генератора модулированных по частоте прямоугольных импульсов

Выводы

Таким образом, генератор прямоугольных импульсов обеспечивает широкие возможности частотной модуляции выходного сигнала и изменение частоты сигнала происходит без разрыва фаз. Достоинство предложенной конструкции генератора заключается в ее реализации по любой КМОП-технологии с использованием стандартных библиотечных элементов, в том числе с наноразмерными технологическими нормами.

Литература

1. Журавлев Д.В. Эффективность преобразования частоты на наноразмерных моп-транзисторах с индуцированным каналом в интенсивной помеховой обстановке / Д.В. Журавлев, А.И. Мушта // Известия высших учебных заведений. Электроника. -2015. -Т. 20. - С.382-390
2. Патент RU 150841 U1 «Генератор прямоугольных импульсов». Шеховцов Д.В., Мушта А.И., Сальников Д.Н. Опубликовано 27.02.2015 Бюл. № 6
3. Шеховцов, Д.В. Методология проектирования аналоговых блоков УБИС, выполненных по субмикронной технологии / Д.В. Шеховцов, Ю.С. Балашов, А.И. Мушта // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. - № 11. С. 174-184.

Воронежский государственный технический университет

АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж

THE GENERATOR OF FREQUENCY MODULATED RECTANGULAR PULSES APPLIED TO THE SUB-MICRON TECHNOLOGICAL BASE

E.B. Barbarina¹, D.V. Shekhovtsov², A.I. Mushta³

¹Graduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: elena_fars@mail.ru

²Ph.D., Head of the Laboratory for Design DSP and Systems on Chip of Scientific research institute of electronic engineering, Voronezh, Russian Federation, e-mail: wexwex@mail.ru

³Ph.D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: micronano1441@yandex.ru

The article is devoted to the development of the generator of rectangular pulses, modulated in frequency. The generator is suitable for implementation in integrated form using topological rules in the sub-micron technological base. Architecture modulated pulse generator is based on the structure of an asynchronous RS-trigger. The peculiarity of the proposed generator is to expand the functionality of the standard asynchronous RS-flip-flop using the original circuit solutions. The trigger in the generator structure generates square-wave pulses. It is possible to eliminate the external oscillator meander. The oscillator circuit has two delay circuit incorporated in the circuit RS-flip-flop feedback, which enables the signal propagation time. Management is carried out through the use of an external oscillator control voltage. Changing the amplitude of the control signal causes a change in resistance of the feedback circuit and the signal propagation time. In the experimental studies of the construction of the generator rectangular pulses have to applied. To do this, the generator was set up in integrated form using standard base components technology library (submicron technology XH035 XFAB factory). High precision simulation of the device showed that the oscillator frequency varies over a wide range, from 47 to 94 MHz. In conclusion, the research designed oscillator topology using the basic technological elements of the library

Key words: square-wave generator, frequency modulation, pro-submicron design rules, MOSFET gates, logical elements

References

1. Zhuravlev D.V., Mushta A.I., "The efficiency of frequency conversion on nanometer-size transistors with an induced channel" ("Эффективность преобразования частоты на nano-размерных МОП-транзисторах с индуцированным каналом в интенсивной помеховой обстановке"), Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektronika 20 (2015): 382-390.
2. Shekhovtsov D.V., Mushta D.I., Sal'nikov A.I. "Square wave generator", "Generator prjamougol'nyh impul'sov," Patent RU 150841 U, 6 (2015).
3. Shekhovtsov D.V., "Methodology for designing of UBIS analog blocks" ("Metodologiya proektirovaniya analogovyh blokov UBIS"), Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta 6-11 (2010): 174-184.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ УСИЛИТЕЛЯМИ БИОПОТЕНЦИАЛОВ

Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов

В любой системе дистанционного контроля функциональных параметров человека основным звеном, обеспечивающим необходимую достоверность регистрируемой информации, являются входные аналоговые узлы приборов регистрации. Повышение достоверности регистрируемой информации необходимо для точной постановки диагноза и объективной своевременной оценки реального функционального состояния объекта исследования. В связи с этим существует острая необходимость повышения помехоустойчивости входных аналоговых узлов приборов регистрации (микродатчиков-регистраторов) без значительного усложнения схемотехнической реализации устройств.

В данной статье проведён теоретический анализ характера действующих помех и вариантов борьбы с ними при регистрации биопотенциалов. Выделена основная группа помех, требующая подавления схемотехническими методами. Рассмотрены пути устранения синфазной помехи при действующей на входе усилителя биопотенциалов ее аддитивной смеси с полезным сигналом. Проведён анализ схемотехнических методов подавления синфазных помех. Рассмотрены варианты построения усилителя биопотенциалов на основе операционных усилителей ОР 191, а также инструментальных усилителей INA 115, INA 118. Из возможных схемотехнических решений выделены пять основных вариантов построения схем усиления. По результатам имитационного моделирования проведено сравнение пяти различных схемотехнических реализаций усилителя биопотенциалов. Выявлена эффективная структура схемотехнической реализации усилителя биопотенциалов. На основе проведенных исследований построена схема усилителя биопотенциалов, обладающая наибольшим коэффициентом подавления синфазных сигналов

Ключевые слова: синфазная помеха, аддитивная смесь, усилитель биопотенциалов, микродатчики-регистраторы

Постановка задачи

Проведенное исследование путей создания тест-системы для диагностики подвижных биологических объектов обусловлено выделенными Президентом РФ приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники (Указ Президента от 7 июля 2011 г. N 899). Среди огромного разнообразия уже реализованных систем телемониторинга новая система отличается тем, что построена на базе носимых индивидуальных средств коммуникации, таких как смартфоны, коммуникаторы, планшетные компьютеры.

Функциональность и эффективность работы системы в первую очередь зависит от характеристик нательных микродатчиков-регистраторов. К важнейшим характеристикам относят: миниатюрность, энергопотребление, достоверность регистрируемой информации. Достоверность напрямую зависит от способности входных узлов выделить низковольтный полезный сигнал из широкого ансамбля помехообразующих сигналов.

Поэтому в данной работе исследованиям вопросов по помехозащищенности входных узлов микродатчиков-регистраторов уделено большое значение.

Помехи, действующие на входе усилителя биопотенциалов

Основной задачей микродатчиков-регистраторов, работающих в составе дистанционной информационно-вычислительной системы контроля биологических параметров человека является регистрация биопотенциалов с минимальными искажениями сигнала. При амплитуде полезного сигнала 5-10 мВ на входе усилителя биопотенциалов могут присутствовать различные помехи амплитудой до десятков вольт, что усложняет схемотехническую реализацию входных узлов.

Помехи, действующие на входе микродатчиков-регистраторов, в зависимости от характера возникновения, разбивают на четыре группы: помехи обусловленные биообъектом (физиологические), методические помехи (артефактные) внутренние (аппаратурные) шумы, внешние помехи [1].

Все органы и ткани исследуемого объекта непрерывно генерируют биопотенциалы различной амплитуды и направленности, что приводит к возникновению физиологических помех. При подавлении физиологических помех целесообразно применение оптимальной пространственно-временной обработки сигнала и цифровой фильтрации. Это значительно эффективнее и выгоднее чем использование схемно-конструктивных методов.

Артефактные помехи возникают при движении исследуемого объекта и нарушении устойчивого контакта кожа-электрод. Поэтому

Журавлёв Дмитрий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: ddom1@yandex.ru, <http://Б-Б.su>
Балашов Юрий Степанович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: faddev52@mail.ru

интенсивно возникают электродные потенциалы. Данные помехи можно описать уравнением:

$$N(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k F_k[(t - t_k)/\tau_k], \quad (1)$$

где $F_k[\cdot]$ – форма импульса; A_k – амплитуда; t_k – время появления; τ_k – длительность k -ой помехи.

Напряжение артефактной помехи на входе усилителя биопотенциалов можно определить как:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{(E_0 + E_1)(R_0 + R_2 + R_{ex2}) - (R_{ex1} + R_1)(R_0 + R_2 + R_{ex2})}{(R_{ex1} + R_1)(R_0 + R_2 + R_{ex2}) + R_0(R_2 + R_{ex2})} \times \\ &\times \frac{-(E_0 + E_2)R_0}{R_{ex1}}; \\ U_2 &= \frac{(E_0 + E_2)(R_0 + R_1 + R_{ex1}) - (R_{ex2} + R_2)(R_0 + R_1 + R_{ex1})}{(R_{ex2} + R_2)(R_0 + R_1 + R_{ex1}) + R_0(R_1 + R_{ex1})} \times \\ &\times \frac{-(E_0 + E_1)R_0}{R_{ex2}}. \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где R_1, R_2 – внутренние сопротивления источников ЭДС сигнальных электродов; R_0 – внутреннее сопротивление источника ЭДС нулевого электрода; E_1, E_2, E_0 – источники поляризационно-гальванической ЭДС.

Для борьбы с артефактными помехами используют цифровые компенсационные методы. Эти методы основаны на разложении отдельных артефактов в ряд Фурье. Однако основной метод борьбы основан на значительном увеличении входного сопротивления усилителя биопотенциалов по сравнению с сопротивлением исследуемого объекта.

Внутренние шумы входных цепей усилителя возникают из-за флуктуаций напряжений и токов, не идеальностью амплитудно- и фазочастотных характеристик каскадов и отдельных входных электрорадиоэлементов.

Аппаратурные шумы, также обычно имеют флуктуационный характер:

$$p[N(t)] = k \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T [N(t_1) - m(t_1)] \times \right. \\ \left. \times [N(t_2) - m(t_2)] \times \right. \\ \left. \times \Theta_N(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \right\}, \quad (3)$$

где $\Theta_N(t_1, t_2)$ – представляет собой обратно корреляционную функцию

Обратно корреляционную функцию можно найти из уравнения:

$$\int_0^T \Theta_N(t_1, t_2) B_N(t_1 - t_2) dt = \delta(t_1 - t_2); \quad (4)$$

$B_N(t_1 - t_2)$ – функция корреляции $N(t)$; k – установленный коэффициент.

Для устранения внутренних шумов применяют современную малошумящую элементную базу и схемно-компенсационные методы.

Внешние помехи возникают на входе усилителя биопотенциалов при действии электромагнитного излучения на сам микродатчик-регистратор, соединительные провода и объект исследования. Внешнее электромагнитное излучение может быть вызвано работой соседней радиоаппаратуры, различными атмосферными явлениями и т.д. Основной причиной возникновения внешних помех являются наводки, возникающие от сети промышленной частоты 50 Гц. Эти помехи являются синфазными по отношению к входам дифференциального усилителя, а полезный сигнал противофазным.

Вследствие наличия вокруг усилителя биопотенциалов множества электрических цепей находящихся в разомкнутом состоянии на его входе возникают наводки от сетей промышленной частоты. При этом плоскость таких цепей должна быть перпендикулярна проводникам соединяющим электроды с входом усилителя.

ЭДС возникающих наводок можно определить по формуле:

$$e_2 = 0.2 \cdot 10^{-6} I_j \frac{\omega S}{l}, \quad (5)$$

где S – площадь наводимого ЭДС [м^2]; l – расстояние от измеряющей рамки до разомкнутой электрической цепи.

Электрическая схема подключения усилителя во время действующей на его входе синфазной помехи, представлена на рис. 1. Можно выделить составляющую входного напряжения от входного полезного сигнала по следующей формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-R_0}{(R_1 + R_{np1})} \cdot U_{\text{ВХ}} \quad (6)$$

Для выделения составляющей входного напряжения от синфазной помехи можно использовать формулу:

$$U_{\text{БЛХ}} = -\frac{R_0 + R_1 + R_{\text{ПР1}}}{R_1 + R_{\text{ПР1}}} \times \times U_{\text{СФ}} - \frac{R_0}{R_1 + R_{\text{ПР1}}} \cdot U_{\text{СФ}} = U_{\text{СФ}} \quad (7)$$

Из приведенных формул можно определить следующее: 1. полезный сигнал усиливается в $R_0/(R_1 + R_{\text{ПР1}})$ раз; 2. синфазные помехи поступают на вход усилителя биопотенциалов без усиления. Поэтому для подавления синфазных помех необходимо выполнить фазовое разделение полезного сигнала и помехи, которые одновременно поступают на симметричный вход дифференциального усилителя биопотенциалов. При этом помехи обычно компенсируют дискриминаторов различного типа.

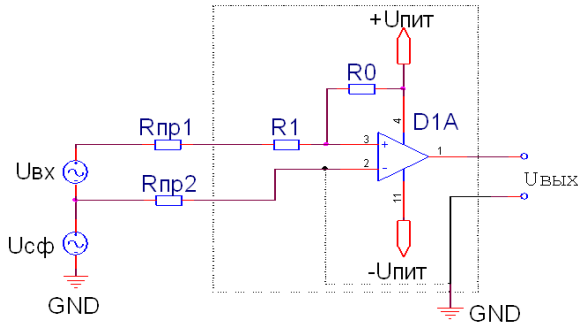


Рис. 1. Схема подключения усилителя при наличии на его входе синфазной помехи

Выходное напряжение каналов схемы подключения показанной на рис. 1 определяется как:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{БЛХ}} &= K_1 U_{01} = U_{\text{БЛХ}} K_1 \frac{Z_{\text{БЛХ1}}}{Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01}}; \\ U_{\text{БЛХ2}} &= K_2 U_{02} = U_{\text{БЛХ2}} K_2 \frac{Z_{\text{БЛХ2}}}{Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{БЛХ1}}, Z_{\text{БЛХ2}}$ – входные сопротивления в комплексном виде; K_1, K_2 – коэффициенты передачи каналов в комплексном виде; Z_{01}, Z_{02} – комплексные внутренние сопротивления на первом и втором плечах схемы.

Обычно на входе усилителя биопотенциалов действует сумма полезного сигнала U_c и помехи U_i (аддитивная смесь).

Общее (суммарное) выходное напряжение схемы можно определить как:

$$U_{\text{БЛХ}} = U_{\text{БЛХ1}} K_1 \frac{Z_{\text{БЛХ1}}}{Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01}} + + U_{\text{БЛХ2}} K_2 \frac{Z_{\text{БЛХ2}}}{Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}} \quad (9)$$

В случае, когда помеха является синфазной относительно нулевой линии сигнала, а сигнал полезный сигнал является паразитным, используя принцип суперпозиции можно получить следующее равенство:

$$U_{\text{БЛХ}} = U_{\text{БЛХ.с}} + U_{\text{БЛХ.н}} = = U_c \left(K_1 \frac{Z_{\text{БЛХ1}}}{Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01}} + K_2 \frac{Z_{\text{БЛХ2}}}{Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}} \right) + + U_n \left(K_1 \frac{Z_{\text{БЛХ1}}}{Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01}} - K_2 \frac{Z_{\text{БЛХ2}}}{Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}} \right) \quad (10)$$

откуда выигрыш:

$$F = \frac{U_{\text{БЛХ.с}}}{U_{\text{БЛХ.н}}} \cdot \frac{U_n}{U_c} = = \frac{K_1 Z_{\text{БЛХ1}} (Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}) + K_2 Z_{\text{БЛХ2}} (Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01})}{K_1 Z_{\text{БЛХ1}} (Z_{\text{БЛХ2}} + Z_{02}) - K_2 Z_{\text{БЛХ2}} (Z_{\text{БЛХ1}} + Z_{01})} \quad (11)$$

Полученный коэффициент F является коэффициентом дискриминации. Этот коэффициент зависит от разбаланса внутреннего сопротивления объекта. Также коэффициент F зависит от величин комплексных коэффициентов передачи каналов (величины комплексных входных сопротивлений; идентичности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ) каналов). При высокой степени симметрии каналов можно считать:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= K_2 = K; \\ Z_{\text{БЛХ1}} &= Z_{\text{БЛХ2}} = Z_{\text{БЛХ}} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Тогда (12) примет такой вид:

$$F = \frac{2Z_{\text{БЛХ}} + Z_{02} + Z_{01}}{\Delta Z_0}, \quad (13)$$

где $\Delta Z_0 = Z_{02} - Z_{01} = |\Delta Z_0| e^{j\Delta\varphi_c}$, т.е. величина подавления синфазной помехи на входе усилителя зависит от комплексных входных со-

противлений каналов и величины разбаланса каналов ΔZ_0 .

При $|Z_{ex}| \gg |Z_{02} + Z_{01}|$:

$$F = \frac{2Z_{ex}}{\Delta Z_0}. \quad (14)$$

Подавление синфазной помехи сильнее, если входное сопротивление усилителя выше, а разбаланс ниже [2].

Из всех приведенных видов действующих внешних помех при регистрации биопотенциалов, одними из наиболее сильно действующих на усилители биопотенциалов являются синфазные помехи. Именно эти помехи обычно подавляют не программными, а схемно-конструктивными методами построения входных цепей усилителей.

Схемно-конструктивные методы борьбы с помехами

Значительно увеличить степень защиты от внешних синфазных помех при регистрации биопотенциалов позволяет применение биполярного метода снятия полезного сигнала. При этом разность потенциалов отводят от двух электродов расположенных в активной области на биообъекте [2].

При этом для обеспечения требуемого усиления довольно низких значений входного полезного сигнала, в условиях, действующих на входе синфазных помех целесообразно применение усилителя биопотенциалов построенного на отдельных операционных усилителях (ОУ) по измерительной схеме включения.

Такую схему называют сумматор-вычитатель или дифференциальная схема усиления [1]. Она активно подавляет дифференциальное напряжение U_{cc} и при этом усиливает только полезный разностный входной сигнал $e_1 - e_2$.

На рис. 2 показана схема измерительного дифференциального усилителя. В этой схеме каждый вход дифференциального усилителя УЗ запитан от повторителей напряжения У1 и У2 для увеличения его входного сопротивления. Для установки коэффициента усиления схемы служит резистор R2. Полное выходное напряжение схемы можно определить как:

$$U_{вых} = 2[1 + R_{o.c.}/R_2] \times (R_{o.c.}/R_1)(e_1 - e_2). \quad (15)$$

Для увеличения коэффициента подавления синфазных сигналов k_C резисторы R_1 , R_1' и $R_{o.c.}$, $R_{o.c.}'$ в разных плечах схемы должны иметь минимально возможные отклонения номиналов.

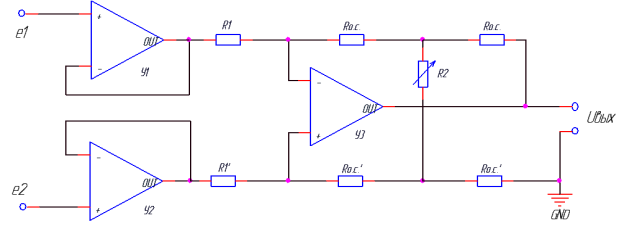


Рис. 2. Измерительный усилитель биопотенциалов

Коэффициент усиления схемы:

$$K = 2[1 + (R_{o.c.}/R_2)(R_{o.c.}/R_1)], \quad (16)$$

где $R_1 = R_1'$, $R_{o.c.} = R_{o.c.}'$.

Выходное напряжение усилителя (рис. 2), полагая, что резисторы в обоих плечах идентичные, будет равно:

$$U_{вых} = (R_{o.c.}/R_1)[1 + 2(R_2/R_3)](e_1 - e_2). \quad (17)$$

Параллельно включенные (в обоих плечах схемы) неинвертирующие ОУ У1 и У2 пропускают входное синфазное напряжение без усиления. Далее синфазное напряжение попадает на сумматор-вычитатель У3, в котором значительно ослабляется.

Выходные напряжения U_1 усилителя У1 и U_2 усилителя У2 определяются формулами:

$$U_1 = [1 + (R_2/R_3)]e_1 - (R_2/R_3)e_2 + U_{cc}, \quad (18)$$

$$U_2 = [1 + (R_4/R_3)]e_2 - (R_4/R_3)e_1 + U_{cc}. \quad (19)$$

Для того чтобы устранить влияние отклонений номиналов резисторов в разных плечах схемы на величину подавления k_C , можно использовать модифицированную схему измери-

тельного усилителя с плавной установкой коэффициента усиления представленную на рис. 3

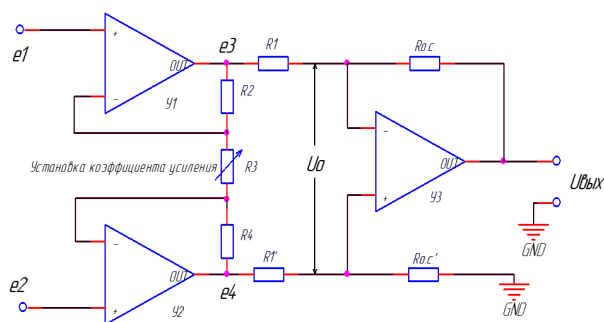


Рис. 3. Доработанная схема усилителя с возможностью плавной установки коэффициента усиления

С учетом обоих каскадов коэффициент усиления доработанного измерительного усилителя определяется по формуле:

$$K = [1 + (2R_2/R_3)] \times (R_{o.c.}/R_1) \quad (20)$$

На рис. 4 показана схема измерительного усилителя с защитой входа. В представленной

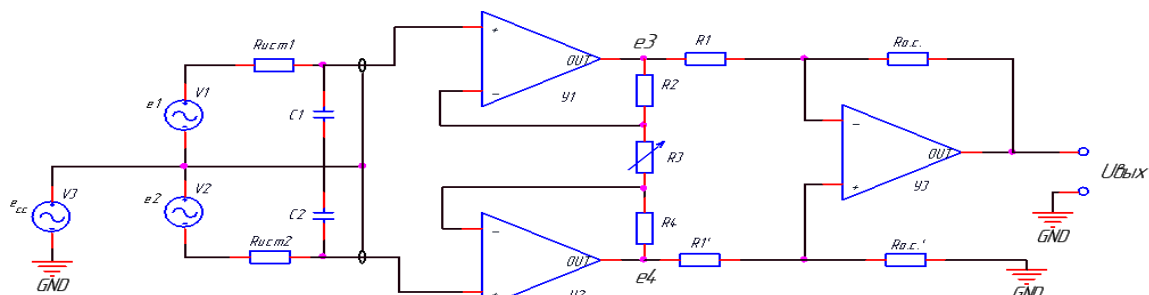


Рис. 4. Защита входа усилителя биопотенциалов

Резисторы R должны быть одинаковых номиналов и они подобраны так, что не нагружают выходы усилителей U1 и U2. Вследствие этого суммарное напряжение, в точке соединения ре-

схеме сигналы, подаваемые на вход, затухают во времени неодинаково, если $R_{ucm1} C_1$ и $R_{ucm2} C_2$ не равны. Величина k_c будет снижаться вследствие того, что $R_{ucm1} C_1$ и $R_{ucm2} C_2$ приводят к неодинаковому затуханию сигналов переменного тока на входах. Это особенно заметно при подавлении напряжения U_{cc} . Емкости C_1 и C_2 представляют собой суммы емкостей входов усилителя, паразитных емкостей и емкостей экрана [2].

Синфазное напряжение не будет затухать под влиянием входных RC-цепей если на экран подать напряжение, равное синфазному. Также не будет заметно различий в затухании по каждому из двух входов. Однако присоединение экрана, как показано на рис. 4, часто вызывает избыточную нагрузку источника входного сигнала.

Для устранения избыточной нагрузки источника входного сигнала подсоединение экрана целесообразно сделать, как это показано на рис. 5.

зисторов, оказывается равным синфазному напряжению U_{cc} .

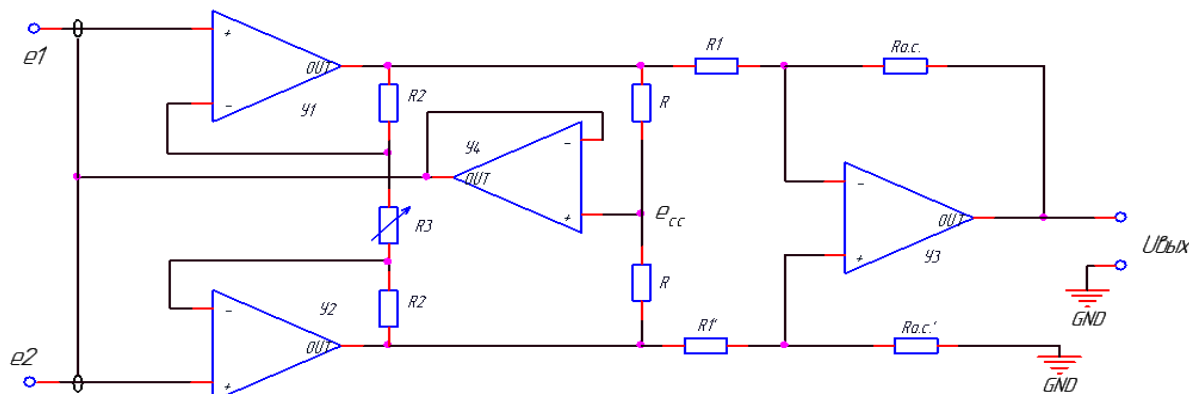


Рис. 5. Схема защиты входа измерительного усилителя при $R_1 = R_1'$, $R_{o.c.} = R_{o.c}'$.

В качестве буфера между схемой и экраном использован повторитель У4. Но можно обойтись и без буфера если емкость экрана будет невелика, а усилители У1 и У2 смогут обеспечить достаточный ток. При этом экран можно присоединить непосредственно к точке соединения резисторов R (средняя точка делителя напряжения).

На рис. 6 показана эквивалентная схема воздействия синфазной помехи обычно генерируемой силовой сетью (220 В) на объект с наложенными электродами

В точке 1 напряжение помех выражается формулой:

$$U_{n1} = \frac{Z_0 + Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0} U \quad (21)$$

В идеализированном случае учитывая хорошую электропроводность тканей биообъекта можно предположить, что в точках 1 и 2 напряжения помех будут одинаковы. Так же можно пренебречь сопротивлением ткани живого объекта Z_0 , так как оно во много раз меньше сопротивления окружающей среды Z_1 и Z_2 . После указанных допущений получим:

$$U_{n1} = U_{n2} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} U. \quad (22)$$

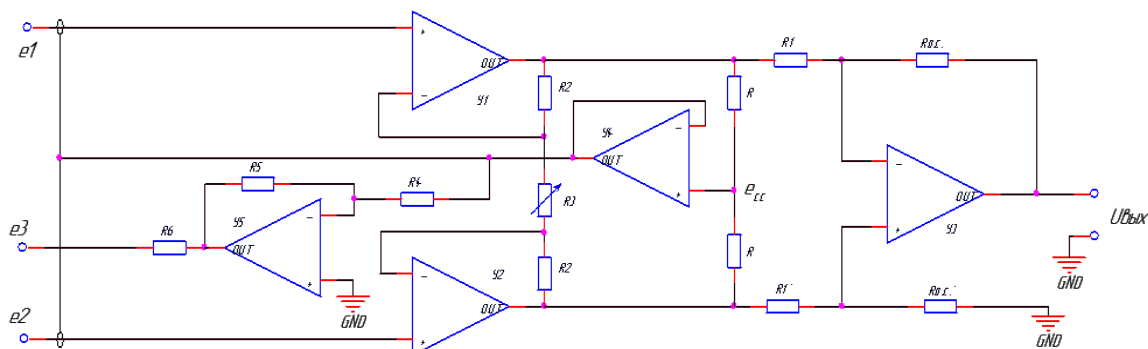


Рис. 7. Схема подавления синфазных помех с помощью активного нейтрального электрода

Из рассмотренных схемотехнических вариантов подавления синфазных помех наибольший эффект дают схемы с активным нейтральным электродом.

Разработка схемы усилителя биопотенциалов (результаты имитационного моделирования).

В ходе исследования были разработаны схемные решения, построенные на различной элементной базе (на операционных усилителях OP191, на инструментальных усилителях INA 115 и INA 118).

При $U = 220\text{В}$, $Z_1 = 2 \cdot 10^8 \text{ Ом}$, $Z_2 = 10^7 \text{ Ом}$ напряжение помех $U_{n1} = U_{n2} = 10,5\text{В}$.

Для дальнейшего ослабления напряжения синфазных помех используют нейтральный электрод. Он соединяет заземляющий провод усилителя с биообъектом.

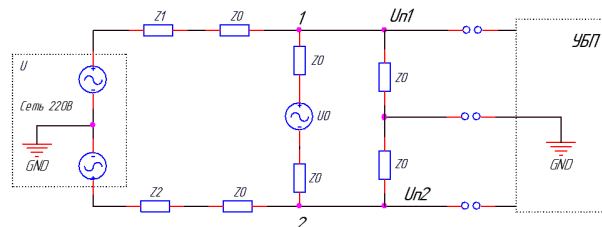


Рис. 6. Эквивалентная схема влияния синфазной помехи от силовой сети на биообъект

После чего $Z_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом}$ и $U_{n1} = U_{n2} = 54\text{мВ}$. Следующий этап в ослаблении синфазных помех основан на использовании активного нейтрального электрода. При этом значительно усиленное напряжение синфазных помех подают с помощью нейтрального электрода на биообъект. Схема подавления синфазных помех с помощью активного нейтрального электрода показана на рис. 7. У5 осуществляет усиление синфазного сигнала наводимого на экранах электродов.

В ГОСТ 19687-89 определена методика вычисления коэффициента подавления синфазных сигналов. Данная методика и использовалась для расчетов приведенных ниже. К усилителю биопотенциалов были подключены источники шумов и полезного сигнала согласно схеме показанной на рис. 8.

Схема включает в себя следующие элементы: С3, С4, С5 – эквивалентные ёмкости экранов электродов; V1, V2 – источники, имитирующие наводки синфазных помех от силовой осветительной сети переменного тока (синусоидаль-

ный гармонический сигнал частотой 50Гц); V3 – источник полезного сигнала (гармонический сигнал частотой 10Гц и амплитудой 5мВ); V5, V6 – дополнительные источники помех (постоянное напряжение $\pm 300\text{мВ}$).

Для различных схем усиления было проведено определение уровня K_C . При этом коэффициенты усиления усилителей были выбраны $k_{\delta} = 600$, а напряжение питания $U_{\text{пит}} = \pm 5\text{В}$.

Расчет K_C исследуемых усилителей биопотенциалов и измерения их параметров были проведены с использованием вышеприведенных вариантов подключения к биообъекту.

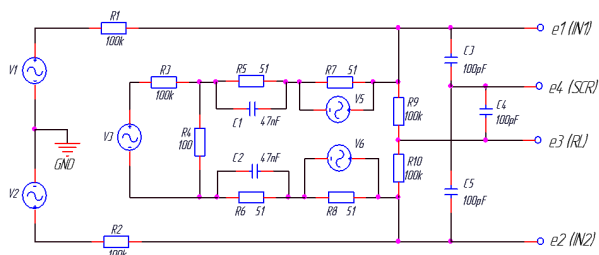


Рис. 8. Источники сигнала для определения K_C

Были применены следующие варианты построения системы “биообъект – усилитель биопотенциалов”: схема 1 – проводники от электродов до входа усилителя не экранированы, но имеется нейтральный электрод, соединенный с общим проводом усилителя; схема 2 – проводники от электродов до входа усилителя экранированы и соединены с общим проводом усилителя вместе с нейтральным электродом; схема 3 – на нейтральный электрод и экраны в схеме 2 подан сигнал соответствующий сигналу синфазной помехи (равный по фазе и амплитуде); схема 4 – на нейтральный электрод (схема 2) подано напряжение синфазных помех в противофазе, усиленное в 40 раз; экраны проводников от электродов до входа усилителя соединены с общим проводом усилителя; схема 5 – на нейтральный электрод (схема 2) подано напряжение синфазных помех в противофазе, усиленное в 40 раз; на экраны проводников от электродов до входа усилителя подан сигнал соответствующий сигналу синфазной помехи (равный по фазе и амплитуде).

Были проведены измерения напряжений входной помехи $U_{\text{ВХ.П}}$, входного сигнала $U_{\text{ВХ.С}}$, выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ.С}}$. Далее был проведен расчет K_C , дБ по формуле:

$$K_C = 20 \lg \left(\frac{\psi_{\text{ВЫХ}}}{\psi_{\text{ВХ}}} \right), \quad (23)$$

$$\text{где } \psi_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.С}} / U_{\text{ВЫХ.П}}, \text{ В;}$$

$$\psi_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ.С}} / U_{\text{ВХ.П}}, \text{ В.}$$

Далее представлены результаты расчёта K_C для описанных выше схем построения усилительной части системы “биообъект – усилитель биопотенциалов”. Для всех схем амплитуда входного полезного сигнала была установлена 5мВ.

Результаты расчета K_C

Вариант включения	OP191	INA115	INA118
K_N , дБ			
Схема 1	118.742	113.598	115.749
Схема 2	119.423	114.178	116.787
Схема 3	121.938	118.688	120.142
Схема 4	123.583	121.873	122.778
Схема 5	125.261	121.777	122.979

Анализируя данные приведенные в таблице можно сделать вывод о том, что наибольшим коэффициентом подавления сигнала K_C обладает схема, построенная на отдельных ОУ (OP191).

Данная схема имеет K_C больший, чем у сходных схем усилителя расположенных в одном корпусе (INA115, INA118). Это связано с особенностями схемотехнической реализации инструментальных усилителей.

Схема, построенная по пятому варианту включения, показала наилучшие результаты в подавлении синфазного сигнала, поэтому она легла в основу разработанного усилителя медико-биологических показателей. Схема разработанного усилителя построенного на операционных усилителях OP191 фирмы Analog Devices представлена на рис. 9 [3].

Измерительный дифференциальный усилитель собран на ОУ U1, U2, U3 марки OP191.

Сумматор-вычитатель, реализованный на микросхеме U3 позволяет выделять полезный сигнал, не усиливая синфазные составляющие, так как он включен по дифференциальной схеме. Сама схема активного подавления синфазных помех собрана на микросхемах U4, U5.

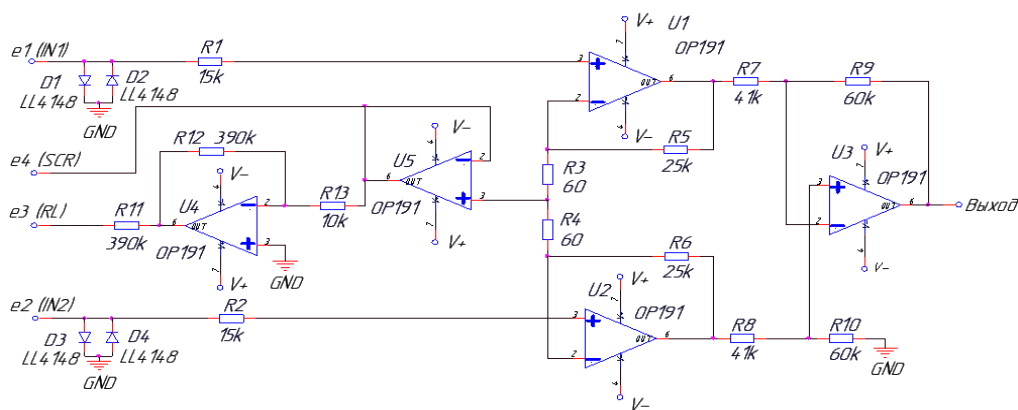


Рис. 9. Схема усилителя на микросхемах OP191

Литература

1. Бакалов, В. П. Основы биотелеметрии / В.П. Бакалов. – М.: Радио и связь, 2001. – 352 с.
2. Биотехнические системы: Теория и проектирование: учеб. пособие / В.М. Ахутин, А.П. Немирко, Н.Н. Першин, А.В. Пожаров, Е.П. Попечителей, С.В. Романов. – Л.: Из-во Ленингр. ун-та, 1981. – 220 с.
3. Системы дистанционного контроля функциональных параметров человека : монография / Д.В. Журавлев, Ю.С. Балашов, А.А. Костин, К.М. Резников. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. – 220 с.

Воронежский государственный технический университет

VARIETY STUDY OF EMERGENCY INTERFERENCE BIOPOTENTIALS

D.V. Zhuravlev¹, Y.S. Balashov²

¹Ph.D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ddom1@yandex.ru

²Ph.D., Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: faddey52@mail.ru

In any system of remote control of human functional parameters the main link providing the necessary authenticity of the recorded information are the input analog nodes of the recording devices. The increase in the reliability of the recorded information is necessary for an accurate diagnosis and an objective timely evaluation of the actual functional state of the research object. Therefore, there is an urgent need to improve the noise immunity of the input analog nodes of the recording devices (micro-sensors, or recorders) without significantly complicating the circuit design of the devices.

In this article, the theoretical analysis of the nature of the interference and options for controlling them during the registration of bio-potentials is carried out. The main group of interference is identified, which requires suppression by circuitry methods. The ways of eliminating in-phase noise at the bio-potentials amplifier operating at the input of its additive mixture with a useful signal are considered. The analysis of circuit-based methods for suppressing in-phase jamming is carried out. The options for constructing the bio-potential amplifier based on operational amplifiers OP 191, as well as instrumental amplifiers INA 115, INA 118 are considered. Five main options for constructing amplification circuits are out of possible circuit solutions.

Based on the simulation results, five different circuit implementations of the bio-potential amplifier were compared. The effective structure of the circuit-based realization of the bio-potential amplifier was revealed. Based on the studies carried out, a bio-potential amplifier circuit was constructed. It has the largest common-mode rejection ratio

Key words: in-phase noise, additive mixture, bio-potential amplifier, micro-sensors-recorders

References

1. Bakalov V. P., "Fundamentals of biotelemetry" ("Osnovy biotelemetrii"), Radio i svjaz' (2001): 352.
2. Ahutin V.M., Nemirko A.P., Pershin N.N., Pozharov A.V., Popechitelev E.P., Romanov S.V., "Biotechnical systems: Theory and design" ("Biotehnicheskie sistemy: Teorija i proektirovanie"), Uchebnoe posobie, Iz-vo Leningr. un-ta (1981): 220.
3. Zhuravlev D.V., Balashov Ju.S., Kostin A.A., Reznikov K.M., "Remote monitoring system of the functional parameters of the person: Monograph" ("Sistemy distancionnogo kontrolja funkcional'nyh parametrov cheloveka : Monografija"), Voronezhskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, (2009) 220.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В СРЕДСТВАХ НЕЛИНЕЙНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

А.В. Волков, В.М. Питолин, С.Н. Паньчев, Н.А. Самоцвет

Статья посвящена актуальной задаче повышения разрешающей способности и помехоустойчивости импульсных сигналов в средствах нелинейной локации. Решение задачи проводится за счет реализации в приемнике нелинейного локатора двух каналов обработки импульсного сигнала. Первый канал позволяет за счет применения модифицированного прямого вейвлет-преобразования (МПВП) на основе вейвлета Морле повысить разрешающую способность приемника. Качественный анализ выходных сигналов для устройств, реализующих предлагаемый способ, свидетельствует об очевидном выигрыше с точки зрения разрешающей способности и точности за счет применения МПВП. Второй канал реализован после блока МПВП и состоит из детектора и двух блоков пересечения, включенных последовательно с элементами задержки, что обеспечивает свертку входных парциальных импульсов в один. Количественная оценка показателей качества помехоустойчивого канала показывает выигрыш примерно от 15 дБ до 22 дБ в зависимости от вида распределения помех. Метод обработки импульсных сигналов и представленная схема являются оригинальными. Степень их проработки и исследования дает возможность сделать однозначный вывод о достоверности, работоспособности и целесообразности дальнейшего развития и применения

Ключевые слова: нелинейная локация, операция пересечения, прямое вейвлет-преобразование

Применение средств нелинейной радиолокации позволяет решать широкий круг задач: поиск взрывных устройств с электронным управлением подрыва, радиомониторинг минных полей и участков местности с возможным местонахождением заржавевших бомб, фугасов, местоопределение диверсионно-разведовательных групп, поиск закладных устройств [1] и т.д. Проведенный анализ технических средств нелинейного радиолокационного зондирования и способов их применения позволил выявить в данной области ряд нерешенных до настоящего времени научных и технических задач, одними из которых являются, низкая помехоустойчивость и разрешающая способность нелинейных радиолокаторов (НРЛ).

Таким образом, целью работы является разработка метода повышения разрешающей способности и помехоустойчивости сигналов в НРЛ.

Особенностью предлагаемого метода является использование в приемнике локатора блока реализующего модифицированное прямое вейвлет-преобразование (МПВП) на основе вейвлета Морле [2]. Трансформация традиционного прямого вейвлет-преобразования (ПВП)

осуществляется путем замены в подинтегральном выражении скалярного произведения $(S(t), \psi(a, b, t))$ на скалярное пересечение $(S(t) \cap \psi(a, b, t))$, которое имеет вид:

$$(S(t) \cap \psi(a, b, t)) = |S(t) + \psi(a, b, t)| - |S(t) - \psi(a, b, t)|.$$

Анализ работы [3] показал, что замена операции умножения на процедуру пересечения $(Z \cap = x \cap y = |x + y| - |x - y|)$ где x и y – входные величины произвольного вида или их дискретные значения в заданные моменты времени, ограничения на которые не накладываются) в радиотехнических операциях возможен при условии

$$\sum_{i=1}^N |x_i| \leq \sum_{i=1}^N |y_i|, \text{ где } x - \text{входной сигнал, } y -$$

опорный сигнал. Данное условие возможно обеспечить при введении в алгоритм обработки коэффициента включения K $(Z \cap = x \cap y = |x + K \cdot y| - |x - K \cdot y|)$, оптимальный выбор которого позволит получить минимальную погрешность радиотехнического преобразования. Значение K в случае с ПВП определяется из условия допустимой погрешности при реконструкции исходного сигнала в результате обратного вейвлет-преобразования (ОВП).

Для заданного базиса $\psi(a, b, t)$ и выбранного значения масштабного коэффициента a , при переходе к МПВП, целесообразно для подчеркивания свойства нечувствительности к синусоидальному сигналу для традиционного ПВП на определенном интервале формирования фазоманипулированного сигнала и сокращения вычислений ограничивать пределы интегрирования некоторыми «эффективными» размерами. С учетом вышеописанного проце-

Волков Алексей Витальевич – ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, преподаватель, e-mail: volkovalexey1984@mail.ru
 Питолин Владимир Михайлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 2238018
 Паньчев Сергей Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: pany4ev@mail.ru
 Самоцвет Николай Андреевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8-951-871-87-04

дура МПВП будет осуществляться в соответствии с выражением:

$$W(a,b) = \int_{b-ca}^{b+c-a} (|S(t) + K \cdot \psi(a,b,t)| - |S(t) - K \cdot \psi(a,b,t)|) dt,$$

$S(t)$ – входной сигнал блока;

$W(a,b)$ – выходной сигнал блока;

$\psi(a,b,t)$ – базис, конструируемый с помощью масштабного коэффициента a и переносов b в пределах длительности принимаемого сигнала в виде:

$$\psi(a,b,t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

для действительной или мнимой части вейвлета Морле в виде:

$$\psi(t) = e^{j2\pi \cdot f \cdot t} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2)$$

где t – время, f – частота, j – комплексная переменная;

K – постоянный множитель, удовлетворяющий неравенству $K \gg S_m$, где S_m – амплитуда сигнала на входе блока;

c – постоянный множитель, удовлетворяющий неравенству $c \geq 3$.

Предлагаемая структурная схема обработки импульсного сигнала, реализующая разрешение сигнала по времени, представлена на рисунке 1.

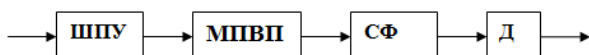


Рис. 1. Структурная схема приемника импульсного сигнала на основе модифицированного ПВП

На рис. 2 и 3 при помощи прикладного пакета Mathcad проведено математическое моделирование обработки сигналов в элементах приемника. Эпюры рис. 1 иллюстрируют процесс обработки импульсного сигнала в элементах приемника нелинейного радиолокатора, а рис. 2 аналогичный процесс для случая, когда входные импульсы накладываются друг на друга.

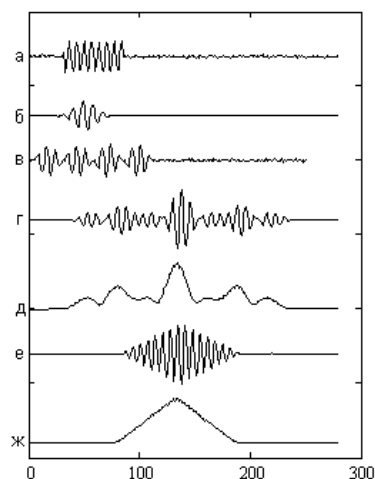


Рис. 2. Процесс обработки сигнала в элементах приемника нелинейного локатора

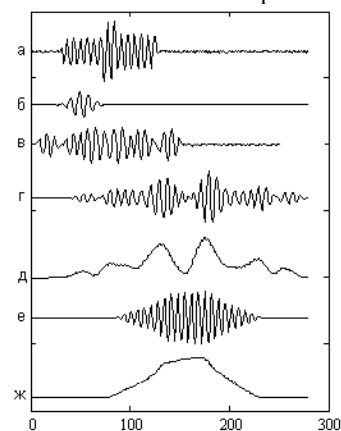


Рис. 3. Процесс обработки двух сигналов в элементах приемника нелинейного радиолокатора

На рис. 2 и 3 (эпюра д) представлен предельный (наихудший) с точки зрения выигрыша в разрешении и потенциальной точности случай.

Из рис. 2 и 3 видно, на вход схемы воздействует импульс (эпюра а), который в результате МПВП (на эпюре б, представлен вейвлет Морле) трансформируется в амплитудно-модулированный фазоманипулированный сигнал в составе четырех парциальных радиоимпульсов (эпюра в). В результате согласованной фильтрации на выходе фильтра имеет место автокорреляционная функция в виде центрального пика длительностью τ и боковых лепестков (эпюра г), представляющая собой сжатый во времени сигнал. После детектирования в обнаружителе получаем огибающую автокорреляционной функции, которая представлена на эпюре д.

Для сравнения на рис. 2 и 3 показаны выходные сигнал согласованного фильтра для известного приемника (эпюра е), представляющий собой радиоимпульс ромбовидной формы, и его огибающая на выходе детектора обнаружителя (эпюра ж). Качественный анализ (срав-

нение) выходных сигналов для устройств, реализующего предлагаемый способ (эпюра *д*) и известный (эпюра *ж*), свидетельствует об очевидном выигрыше с точки зрения разрешающей способности и точности, за счет применения МПВП. В случае, когда парциальные импульсы (эпюра *в*), определяемые эффективной длительностью вейвлета Морле, укладываются на интервале длительности импульсного сигнала (эпюра *а*), выигрыш $V \approx 4$.

В связи с тем, что в НРЛ используются импульсные сигналы и уровни нелинейных откликов от объектов с нелинейными электрическими свойствами на гармониках невелики, то необходимо решать задачу повышения помехоустойчивости НРЛ.

Структурная схема приемника, реализующая два канала обработки сигнала представлена на рис. 4.

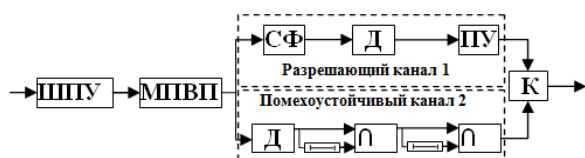


Рис. 4. Схема приемника, реализующего два канала обработки

Особенность реализации помехоустойчивого канала обработки заключается в использовании в приемнике НРЛ после блока МПВП детектора и двух блоков пересечения [3], включенных последовательно с элементами задержки. Каждый из этих блоков реализует процедуру $Z_n = x \cap y = |x + y| - |x - y|$ (рис. 5) и обеспечивает снижение дисперсии шума. В целом же канал позволяет существенно ослабить нестационарные помехи типа импульсных и шумовых всплесков и обеспечивает свертку входного сигнала (рис. 2 и 3 эпюра *в*).

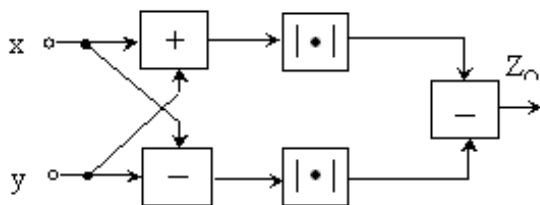


Рис. 5. Алгоритмическая схема реализации функциональной процедуры пересечения

На рис. 6 приведены эпюры иллюстрирующие процесс обработки сигналов и помех в помехоустойчивом канале, на фоне нормально распределенного шума.

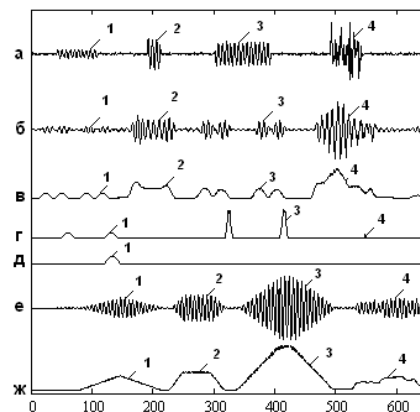


Рис. 6. Эпюры работы помехоустойчивого канала приемника НРЛ на фоне нормально распределенного шума

На рис.6 (эпюра *а*) показан полезный сигнал в виде прямоугольного радиоимпульса единичной амплитуды – 1, короткоимпульсная помеха – 2, длинноимпульсная помеха – 3 и помеха типа «шумовая вспышка» – 4.

После прохождения через блок МПВП (эпюра *б*), детектирования (эпюра *в*) и обработки двух блоков пересечения выходной сигнал будет представлять свернутый полезный сигнал – 1 (эпюра *д*), где помехи и шумы скомпенсированы. Для сравнения на эпюрах *е* и *ж* представлена обработка сигналов НРЛ известным методом.

Для количественной оценки эффективности предлагаемого приемника проведено определение статистических показателей качества. За показатели качества приняты: вероятность ложной тревоги $P_{лт}$, вероятность правильного обнаружения $P_{об}$, вероятность ошибки $P_{ош}$.

Оценка указанных вероятностей производилась, как отношение числа положительных исходов n к общему числу опытов N : $P^* = \frac{n}{N}$.

Зависимость вероятностей ложной тревоги от относительного порога обнаружения приведена на рис. 7:

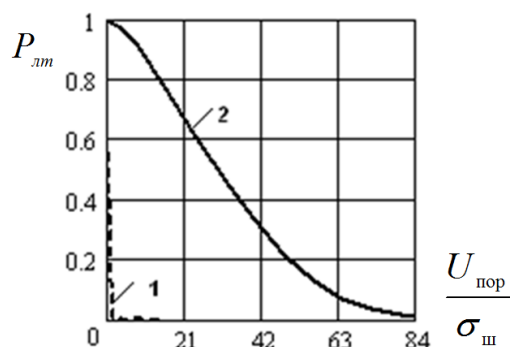


Рис. 7. Зависимость вероятности ложной тревоги от относительного порога обнаружения

Данная зависимость рассчитывалась относительно выражения: $P_{лт} = f(U_{пор}/\sigma_{ш})$, где обозначено: $U_{пор}$ – значение порога, $\sigma_{ш}$ – среднеквадратическое значение шума на выходе исследуемой схемы. Кривая, обозначенная цифрой 1, характеризует предлагаемый приемник, а цифрой 2 – известный.

Оценка $P_{об}$ проведена при фиксированных для каждой схемы порогах обнаружения, обеспечивающих одинаковую вероятность ложной тревоги $P_{лт} = 0,016$ для сопоставления результатов. Зависимости вероятностей правильного обнаружения $P_{об}^* = f(U/\sigma_{ш})$ от относительного значения сигнала на входе $P_{лт} = 0,016$ представлены на рис. 8.

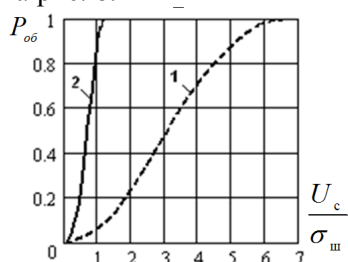


Рис. 8. Зависимость вероятности правильного обнаружения от относительного значения сигнала на входе

На рис. 8 обозначено: 1 – $P_{об}$ для предлагаемого способа обработки, 2 – $P_{об}$ для известного. Зависимости $P_{об}$ свидетельствуют о наличии потерь полезного сигнала в предлагаемом приемнике по сравнению с известным, что обусловлено алгоритмом работы.

Зависимости вероятностей ошибочного срабатывания в условиях импульсной помехи от отношения помеха/шум на входе приведены на рис. 9 и 10 в виде $P_{ош} = f(U_n/\sigma_{ш})$ при $P_{лт} = 0,016$.

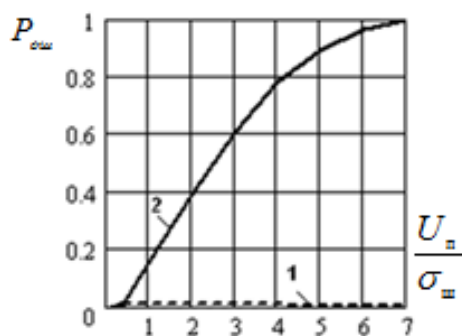


Рис. 9. Зависимость вероятности ошибки при приеме короткой помехи

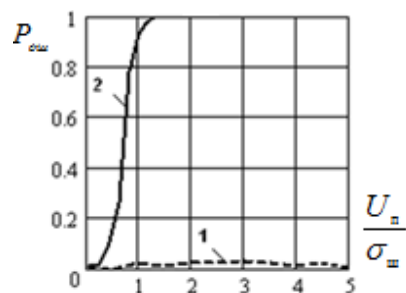


Рис. 10. Зависимости вероятности ошибки при приеме длинной помехи

Зависимости на рис. 9 и 10, соответствуют вероятности ошибки при приеме «короткой» и «длинной» помехи, где обозначено 1 – $P_{ош}$ предлагаемого приемника, 2 – известного.

Количественная оценка показателей качества помехоустойчивого канала показывает выигрыш примерно от 15 дБ до 22 дБ в зависимости от вида распределения помех.

Таким образом, полученные оценки и результаты моделирования подтверждают эффективность использования предлагаемого способа обработки импульсных сигналов в интересах улучшения разрешающей способности и повышения помехоустойчивости.

Литература

1. Вернигоров Н. С. Практические применения нелинейного локатора / Н. С. Вернигоров // Безопасность от А до Я. 1998. № 2–3. – С.14–15.
2. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / В.П. Дьяконов. М.: СОЛОН – Пресс, 2004. – 100с.
3. Универсальный многофункциональный структурный элемент систем обработки информации / В.И. Гордиенко, С.Е. Дубровский, Р.И. Рюмшин, Д.В. Фенев // Радиоэлектроника. Изв. ВУЗов. 1998. - № 3. С. 12-20.
4. Волков, А. В. Синтез схемы дальномаршпеленгатора на основе процедур пересечения и объединения с обработкой сигнала во временной области / А.В. Волков, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 4. - С. 12-14
5. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации / В.Б. Авдеев, С.Н. Паныхчев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 94-98
6. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств / В.М. Питолин, С.Н. Паныхчев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 6.3. С. 45-48.
7. Самоцвет, Н.А. Анализ методов формирования сигналов и помех с заданными законами распределения параметров / Н.А. Самоцвет, В.М. Питолин, А.В. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - № 5.1. - С. 34-36.

THE METHOD OF INCREASING THE RESOLVING CAPABILITY AND NOISE RESISTANCE SIGNALS IN NONLINEAR RADAR

A.V. Volkov¹, V.M. Pitolin², S.N. Panychev³, N.A. Samotsvet⁴

¹Ph.D, Tutor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russian Federation
e-mail: volkovalexey1984@mail.ru

²Ph.D, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

³Ph.D, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: pany4ev@mail.ru

⁴Graduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: csir.ntc.reb@gmail.com

The article is devoted to the actual problem of increasing the resolving power and noise immunity of pulsed signals by the means of nonlinear location. The solution of the problem is carried via the installation of the nonlinear locator of two channels for processing the pulse signal in the receiver. The first channel allows using the modified direct wavelet transformation (MPVP) based on the Morlet wavelet to increase the resolving power of the receiver.

A qualitative analysis of the output signals for devices implementing the proposed method indicates an obvious improvement in terms of resolving power and accuracy due to the use of MPVP. The second channel is implemented after the block of MPVP and consists of a detector and two crossing blocks, connected in series with the delay elements, which ensures the convolution of the input partial impulses into one. The quantification of the quality of the noise-proof channel shows a gain of about 15 dB to 22 dB, depending on the type of interference distribution. The method for processing pulse signals and the presented circuit are original outcomes of the research. The degree of their study and research makes it possible to draw an unambiguous conclusion about the reliability, efficiency and appropriateness of further development and application of the device

Key words: nonlinear detection, crosscut procedure, direct wavelet-decomposition

References

1. Vernigorov N. S., “Practical applications of a nonlinear locator” (*“Prakticheskie primeneniya nelinejnogo lokatora ”*), Bezopasnost'ot A do Ja 3 (1998): 14–15.
2. Djakonov V.P., “Wavelet From the theory to practice” (*“Vejvlety. Ot teorii k praktike”*), Solon – Press, (2004): 100.
3. Gordienko V.I., Dubrovskij S.E., Rjumshin R.I., Fenev D.V., “Universal multipurpose structural element of systems of information processing” (*“Universal'nyj mnogofunkcional'nyj strukturnyj jelement sistem obrabotki informacii”*), Radioelektronika, (1998) 12-20.
4. Volkov A. V., Pitolin V.M., Samocvet N.A., “Synthesis of the scheme of a range finder direction finder on the basis of procedures of crossing and association with processing of a signal in a time domain” (*“Sintez shemy dal'nomera-pelengatora na osnove procedur peresecheniya i obedineniya s obrabotkoj signala vo vremennoj oblasti”*), Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 9 (2013) 12-14.
5. Panychev S.N., Avdeev V.B., Denisenko N.G., Samocvet N.A., Skovpin M.S., “Optimal reception and processing of radio signals in the nonlinear channel of VCh-radiation for remote removal of acoustic information” (*“Optimal'nyj priem i obrabotka radiosignalov v nelinejnom kanale VCh-oblucheniya dlja distancionnogo snjatija akusticheskoy informacii”*), Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 10 (2014): 94-98.
6. Samocvet N.A., Pitolin V.M., Panychev S.N., Akulinin S.A., “Settlement and tool method of the analysis of passing of casual process through a nonlinear chain” (*“Jeksperimental'no raschetnyj metod opredeleniya dvuhsignal'noj izbiratel'nosti cifrovyyh radiopriemnyh ustrojstv”*), Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 9 (2013): 45-48.
7. Samocvet N.A., Volkov A.V., Panychev S.N., Pitolin V.M., “Experimental calculation method of determination of bisignal selectivity of digital radio-receiving devices” (*“Analiz metodov formirovaniya signalov i pomeh s zadannymi zakonami raspredeleniya parametrov”*), Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta, 9 (2013): 34-36.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ЗАКРЫТЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В.В. Глотов, М.А. Ромащенко

На современном этапе проблема электромагнитной совместимости играет значимую роль в развитии радиоэлектронной аппаратуры. Большинство разработчиков стараются миниатюризировать электронные компоненты, из-за чего увеличиваются шансы сбоев в работе электронных средств. Для экономии фонда рабочего времени и денежных средств вполне логично и целесообразно выявлять проблемные места печатной платы на ранних стадиях разработки. В статье представлено описание методики оценки электромагнитных характеристик печатных плат в закрытых конструкциях. Описываются изменения электромагнитных характеристик печатной платы в закрытой среде и в свободном пространстве. Также в статье рассказывается об изменении протекания тока в Г-образной микрополосной линии. Проводится сравнение излучающих потерь печатных плат, которые были смоделированы в ходе эксперимента

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, печатные платы, корпус, излучения

Размещение элементов с высокой плотностью широко применяется в современных конструкциях печатных плат (ПП). Однако это приводит к большому количеству проблем электромагнитной интерференции между ПП и корпусом изделия. Это особенно касается крупных электронных систем с несколькими ПП [1]. Следовательно, вопрос электромагнитной совместимости (ЭМС) ПП должен включать раздел взаимодействия между ПП и корпусами.

В данной работе эквивалентная дипольная модель расширена для представления ПП в закрытых помещениях. Эта методика привлекательна из-за своей вычислительной простоты и независимой информации о схеме. Тем не менее, эквивалентные дипольные модели, найденные либо из решения обратной задачи, либо из генетической оптимизации алгоритма не работают в закрытых конструкциях. Такой пример показан на рис. 1, где проводились, как полное моделирование поля, так и эквивалентное дипольное моделирование вне прогнозируемого поля, возбужденного в Г-образной микрополосковой линии, внутри корпуса на частоте 4 ГГц.

Геометрическая конфигурация модели подробно описана на рис. 1 (а). Полное моделирование поля, которое выступало в качестве эталона для точности измерения эквивалентной модели как ПП, так и корпуса было смоделировано методом моментов. В то время как в эквивалентной дипольной модели

ПП была заменена эквивалентной моделью, состоящей из диполей и заземлений, полученной из ближнего поля сканирования в свободном пространстве. Установлено, что оба результата совершенно не согласованы [2]. Одной из возможных причин является то, что в свободном пространстве эквивалентная модель представляет только электромагнитные возбуждения ПП, но не взаимодействия между ПП и корпусом. Точные модели в закрытых помещениях требуют эквивалентное представление для обоих излучающих источников и взаимодействий между ПП и корпусом.

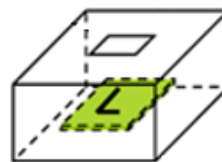


Рис. 1. Печатная плата 80×50×15 мм в корпусе 100×70×40 мм, с отверстием в центре крышки 20×20 мм

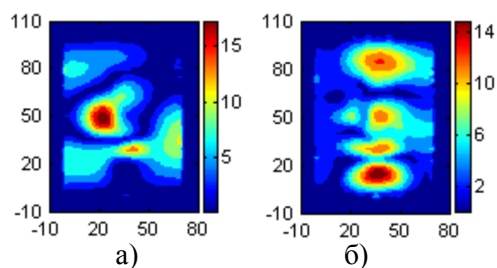


Рис. 2. Область Г-образной микрополосковой линии внутри корпуса, полученная путем моделирования ПП: а) с полной моделью поля и б) свободного пространства эквивалентной модели

Глотов Вадим Валерьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: vadik-livny@mail.ru
Ромащенко Михаил Александрович - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: kivr@vorstu.ru

При изучении этого проекта было обнаружено, что из-за физического присутствия ПП происходят изменения при распространении волны, которые влияют на

излучения в большей степени, чем на изменения токов ПП в закрытых помещениях. Этот эффект является наиболее важным фактором, характеризующим взаимодействие между ПП и корпусом.

Другие эффекты вызываются множественными взаимодействиями, такие как изменение распределения тока, потери излучения и импеданса. Таким образом, эквивалентная модель должна представлять не только излучения, но и грубое физическое присутствие ПП, например, его плоскость земли и диэлектрического тела. Для этой цели эквивалентная модель расширена, чтобы явно включать в себя плоскость заземления и диэлектрик. Эта модель называется «диполь - диэлектрик - проводящая плоскость», которая представляет собой общее представление ПП, модель в свободном пространстве.

Электромагнитные характеристики печатной платы в закрытых системах. После того, как ПП установлена внутри корпуса, будет происходить множество взаимодействий, в том числе и некоторые факторы, такие как многократные отражения индуцированных токов и демпфирование полей ПП и т.д.

Так же затрагиваются электромагнитные характеристики ПП. Но эквивалентные модели, полученные из ближнего поля сканирования, в свободном пространстве не выявляют эти эффекты. Поэтому для того, чтобы установить эквивалентные модели в закрытых пространствах, множественные эффекты взаимодействия на ПП должны быть дополнительно смоделированы [3].

В качестве источника излучения ПП, как правило, берется текущее распределение токов, импеданс и физическое присутствие самой ПП. В данной работе описывается приближенная модель, которую имеет смысл рассматривать только на существенно влияющих характеристиках ПП. По этой модели был проведен ряд экспериментов и моделирований для проверки электромагнитных характеристик ПП как в свободном пространстве, так и в замкнутом пространстве.

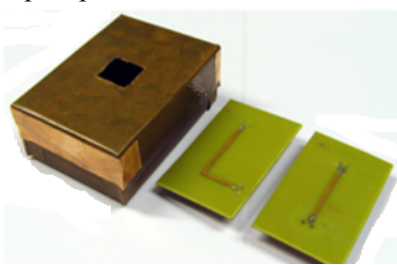


Рис. 3. Внешний вид тестовой разработки

Тест был проведен из корпуса, выполненного из меди толщиной 1 мм с геометрическими размерами 100×70×40 мм. На крышке корпуса имеется отверстие 20×20 мм, как показано на рис. 3. Когда ПП была помещена в корпус, крышка была запечатана с помощью медной ленты. Частота среза для данной конструкции вычисляется по формуле:

$$F_{cmm} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{m^2}{a} + \frac{n^2}{b} + \frac{p^2}{c}} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot \mu} \quad (1)$$

где ε и μ – это диэлектрическая проницаемость и проницаемость сред; a , b и c – геометрические размеры коробки ($a \geq b \geq c$); m , n , и p – порядковые номера ($m = 1$, $n = 1$, $p = 0$). Частота среза для данной коробки составляет около 2,62 ГГц.

Ток распространения на печатной плате. Одной из основных характеристик, являющееся излучающим источником конфигурации ПП в корпусе, является распределение тока на ПП [4]. Г-образная микрополосковая линия была выбрана в качестве излучающего источника, и ее сравнивали с распределением токов в свободном пространстве и в закрытой конструкции. На одном конце дорожки был подключен источник напряжения 1 В с сопротивлением 50 Ом, а на другом конце дорожки была прекращена нагрузка в 50 Ом. Токи были получены путем численного моделирования ПП на основе методов моментов, как показано на рис. 4. В замкнутом пространстве модель ПП была расположена на 8,5 мм выше дна корпуса. Идентичные сетки были использованы для ПП, как в свободном пространстве, так и в закрытой среде.

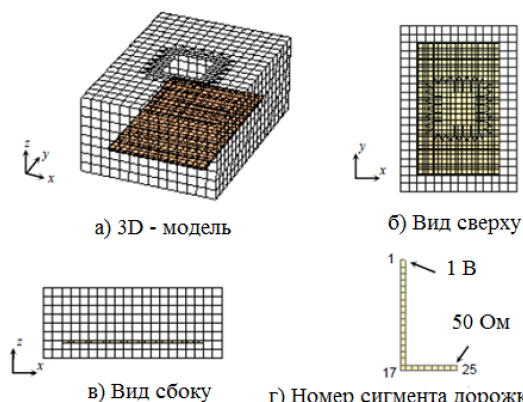
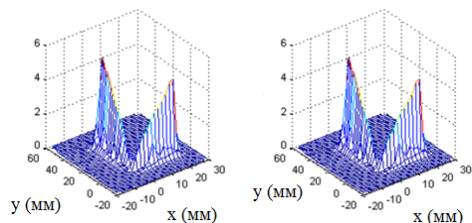


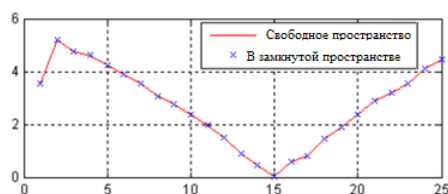
Рис. 4. Полная модель Г-образной микрополосковой линии внутри корпуса

На рис. 5 изображено распределение тока на частоте 1 ГГц, показывающее всю карту интенсивности на верхней поверхности

конструкции и детальный вид вдоль Г-образной дорожки. Эта частота ниже среза, таким образом, есть только локализованные моды. Замечено, что распределение тока в замкнутой среде практически идентично тому, что в свободном пространстве.



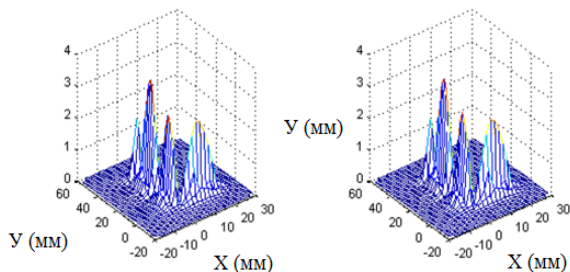
а) Карта распределения частоты выше печатной платы



б) Наблюдение вдоль дорожки

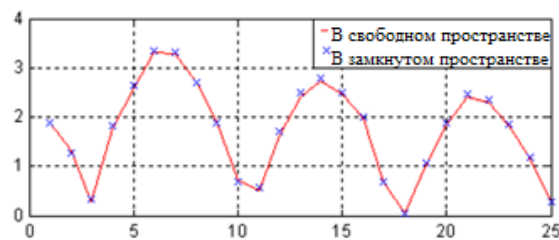
Рис. 5. Распределение тока на Г-образной микрополосковой плате в свободном пространстве и в испытательной коробке на частоте 1 ГГц

Распределение тока на более высокой частоте 4 ГГц представлено на рис. 6. Тем не менее, изменение распределения тока в замкнутой среде не имеет существенного значения (<1% при 4 ГГц). Для приближенной эквивалентной модели можно с уверенностью предположить, что изменение является незначительным. Это означает, что эквивалентные диполи, полученные из ближнего поля сканирования в свободном пространстве все еще в состоянии отражать текущее распределение ПП в закрытых помещениях.



а) Карта распределения частоты выше печатной платы

Рис. 6. Распределение тока на Г-образной микрополосковой плате в свободном пространстве и в испытательной коробке на 4 ГГц



б) Наблюдение вдоль дорожки

Рис. 6. Распределение тока на Г-образной микрополосковой плате в свободном пространстве и в испытательной коробке на 4 ГГц (продолжение)

Потери при излучении. Излучающие потери - это отношение мощности, излучаемой от ПП, на мощность, подводимой к ПП [5]. Это является показателем эффективности ПП в качестве излучающего источника. Эквивалентные диполи представляют только излучаемую долю от общей мощности. Следовательно, если потери на излучение существенно изменяются с помощью множественных взаимодействий, то они должны быть приняты во внимание в эквивалентных моделях. Экспериментальные измерения векторным анализатором является удобным способом охарактеризовать потери на излучения. Для Г-образной микрополосковой ПП, конец источника дорожки обозначают в качестве порта 1, а торцевой нагрузки портом 2 (оба конца подключают к векторному анализатору через 50 Ом, через коаксиальный частотный разъем (SMA)). Параметры рассеивания S_{11} (отраженная мощность) и S_{21} (передаваемая мощность) были измерены, тогда потери мощности могут быть вычислены с помощью следующей формулы:

$$\begin{aligned} \text{Суммарные потери излучений} &= \\ &= \text{потери} + \text{прочие потери} = \\ &= -|S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Хотя измерение включает другие потери, например, потери, связанные с индуцированными токами, то излучающие потери составляют основную часть общих потерь. Измерения проводились в свободном пространстве и в корпусе независимо друг от друга. Полученные результаты показаны на рис. 7. До 5 ГГц потери от ПП в свободном пространстве и в закрытой среде не имеют существенного значения. Почти такая же доля мощности применяется к плате, которая полностью включена в эквивалентную дипольную модель, полученную из ближнего

поля сканирования в свободном пространстве.

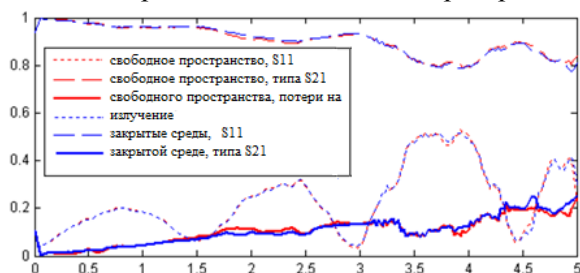


Рис. 7. Параметры потерь излучений Г-образной микрополосковой платы в свободном пространстве

Литература

1. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев.- М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.

2. Электронный каталог Лаборатория ЭМС. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.emc-problem.net>.

3. Макаров, О.Ю. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография / О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, М.А. Ромащенко. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. – 234 с.

4. Ромащенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения / М.А. Ромащенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 4. – С. 106-109.

5. Ромащенко, М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ромащенко Михаил Александрович. - Воронеж, 2014.-36с.

Воронежский государственный технический университет

ASSESSMENT METHOD OF ELECTROMAGNETIC PERFORMANCE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS IN CLOSED STRUCTURES

V.V. Glotov¹, M.A. Romashchenko²

¹Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: vadik-livny@mail.ru

²Ph.D., Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: kopr@vorstu.ru

Currently, the problem of electromagnetic compatibility plays an important role in the development of radio electronic equipment. Most developers are trying to minimize electronic components, which increases the risks of failure in the operation of electronic tools. To save time and money, it is quite logical and expedient to identify the problem spots of the printed circuit board in the early stages of its development.

The description of the technique for the estimation of electromagnetic characteristics of printed-circuit-boards in the closed designs is presented in the article. Changes in the electromagnetic characteristics of the printed circuit board in a closed environment and in free space are described. Moreover, the article describes the change in the current flow in the L-shaped micro strip line. The emitting losses of printed circuit boards are compared as well

Key words: electromagnetic compatibility, printed circuit boards, housing, radiation

References

1. Kechiev L.N., "Designing of printed circuit boards for high-speed digital hardware" ("Proektirovanie pechatnyh plat dlja cifrovoj bystrodejstvujushhej apparatury"), Moscow, "Grupa IMT", (2007): 616.
2. OPAC EMC Laboratory. "Electron. Dan," <http://www.emc-problem.net>
3. Makarov O.U., Muratov A.V., Romashchenko M.A., "Methodology to ensure electromagnetic compatibility and noise immunity within the construction of electronic devices" ("Metody obespechenija vnutriapparaturnoj jelektronnnoj sovmestimosti i pomehoustojchivosti v konstrukcijah jelektronnyh sredstv"), Monograph – Voronezh, VPO "Voronezh State Technical University", (2013): 234.
4. Romashchenko M.A., "Basic EMC software analysis tasks in REM designs and the principles of its implementation ("Osnovnye zadachi analiza obespechenija EMC v konstrukcijah RES i principy ego vypolnenija"), Bulletin of Voronezh State Technical University 7-4 (2011): 106-109.
5. Romashchenko M.A., "Methodology for designing constructions of radio electronic devices based on electromagnetic compatibility and interference immunity" ("Metody optimal'nogo proektirovanija konstrukcij radioelektronnyh sredstv s uchedom jelektronnnoj sovmestimosti i pomehoustojchivosti"), Romashchenko M.A.- Dissertation Abstract, Voronezh (2014): 36.

ЧМ-ГЕНЕРАТОРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА РЕЗОНАТОРАХ И УЗКОПОЛОСНЫХ ФИЛЬТРАХ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

М.И. Бочаров, А.О. Рыжов

К формирователям радиосигналов информационно-телекоммуникационных систем предъявляются высокие требования (к стабильности частоты, уровню внеполосного и шумового излучений, технологичности). Это особенно актуально для диапазонов УВЧ и СВЧ, на которых работают современные телекоммуникационные системы. Однако использование традиционного метода переноса спектра частот кварцевых генераторов, работающих на относительно низких частотах, на более высокие частоты, основанного на умножении частоты, приводит к существенному ухудшению параметров сигналов. Более перспективным является использование ЧМ-генераторов на поверхностных волнах (ПАВ).

В данной работе для базовой схемы ЧМ-генераторов на ПАВ-резонаторах при управлении частотой варакторов, работающих в барьерном режиме, разработана методика расчета основных видов нелинейных искажений, возникающих при формировании ЧМ-радиосигналов. Методика основана на расчетных соотношениях для девиации основной частоты и ее гармоник, сдвига центральной частоты, полученных с использованием статической и динамической модуляционных характеристик. Рассматриваются режимы в зависимости от изменения амплитуд напряжений, управляющего, высокочастотного сигналов и напряжения смещения, что охватывает все возможные режимы работы генераторов, используемые на практике, для варакторов с резким и сверхрезким p - n переходами. Это позволяет уже на этапе эскизного проектирования на основе справочных параметров ПАВ-резонаторов и используемых варакторов определить быстро и достаточно точно минимальные уровни нелинейных искажений.

Результаты проведенного моделирования и экспериментальных исследований свидетельствуют о достаточно высокой точности совпадения результатов расчета и эксперимента и возможности практической реализации формирователей ЧМ-сигналов с малыми нелинейными искажениями без применения корректирующих цепей и целесообразности применения предложенной методики при проведении эскизного проектирования. При этом по уровню шумового излучения и уровню выходного сигнала, создаваемого непосредственно автогенератором, исследуемый формирователь значительно превосходит параметры радиосигналов, реализуемых на основе кварцевых генераторов, что свидетельствует о перспективности его применения в системах связи и измерительных устройствах

Ключевые слова: ПАВ-резонатор, базовая схема, девиация частоты, варактор, сдвиг центральной частоты, нелинейные искажения, моделирование, экспериментальные исследования

К генераторам современных телекоммуникационных систем предъявляются высокие требования по ряду технических параметров: нестабильности частоты колебаний, помехозащищенности, уровню побочного, внеполосного и шумового излучений, механической прочности, миниатюрности и технологичности.

Традиционно высокостабильные колебания генерируются кварцевыми генераторами [1]. Однако эти устройства имеют ряд существенных недостатков: низкий уровень рабочих частот, большой уровень фазовых шумов в области высоких частот, когда колебания формируются путем умножения частоты сигналов, полученных на более низких частотах [2].

Перспективным для генерирования высокостабильных колебаний и формирования ЧМ сигналов в диапазонах ультравысоких частот и СВЧ является использование генераторов, выполненных на основе ПАВ элементов: резонаторов и узкополосных фильтров, которые при работе в диапазоне указанных частот при нестабильности частоты, близкой к кварцевым генераторам,

позволяют получить значительно большую девиацию частоты, обеспечивают более низкий уровень шумового излучения при большем уровне выходного сигнала, недостижимом для кварцевых генераторов, имеют более широкую номенклатуру элементов, более простое ее сопряжение с другими устройствами и высокую технологичность [3].

Однако известной из литературы информации недостаточно для определения усредненных характеристик указанных устройств по известным (справочным) значениям параметров используемых ПАВ элементов, что необходимо для эффективного проведения эскизного проектирования.

Так, проведенный в [4] теоретический анализ типовых схем генераторов на ПАВ не позволяет определить при заданном значении девиации частоты уровень нелинейных искажений для конкретных параметров ПАВ резонаторов и характеристик варакторов. В другом случае технические характеристики широкого круга промышленно выпускаемых устройств на ПАВ элементах широко представлены [5], однако их характеристики не связаны с конкретными параметрами и режимами работы их компонентов.

Для современных телекоммуникационных систем важным показателем является уровень нелинейных искажений, уровней шумового и побочного излучений.

Бочаров Михаил Иванович – ВГТУ, канд. техн. наук,

доцент, e-mail: komandor20132013@mail.ru

Рыжов Антон Олегович – ВГТУ, студент, e-mail: ryzhov777@yandex.ru

Для выявления оптимальных режимов работы формирователей ЧМ колебаний необходимо определить оптимальные характеристики базовых схем генераторов. Так при реализации генераторов на основе одноходовых ПАВ резонаторов предпочтение имеют одноконтурные автогенераторы (АГ) с емкостной обратной связью, схемы которых практически полностью совпадают с аналогичными схемами кварцевых генераторов [3].

При этом для большей стабильности частоты, которая определяется добротностью резонатора, следует также обеспечить наименьшее шунтирование ПАВ резонатора транзистором. Для этого необходимо использовать включение резонатора между базой и коллектором транзисторов [1] и обеспечить возбуждение генератора на частоте, близкой к частоте последовательного резонанса его колебательной системы. При этом наибольшую управляемость по частоте достигается в схеме с заземленным коллектором по ВЧ.

Следует отметить, что при формировании ЧМ сигнала важное значение имеют управители частоты, в качестве которых во многих случаях используются варакторы, работающие в барьерном режиме с резким и сверхрезким р-п-переходами.

Управление частотой с использованием варакторов имеет и недостатки [6]: высокий уровень нелинейных искажений и значительный сдвиг центральной частоты, что приводит к уменьшению помехозащищенности телекоммуникационных систем.

Для уменьшения нелинейных искажений используются различные методы [8]. Однако они требуют дополнительной доработки и не всегда дают желаемых результатов. Что касается сдвига центральной частоты, то для его уменьшения также используются различные методы, напр.[9].

Для оценки основных характеристик ЧМ генератора используется устройство, схема которого приведена на рис. 1 [1], выполненное на биполярном транзисторе с заземленным коллектором по ВЧ, позволяющую реализовать наибольшую перестройку по частоте и максимальную девиацию частоты.

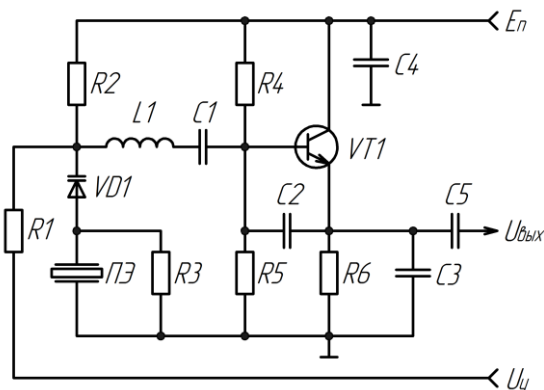


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

Однако предложенная в этой работе методика определения нелинейных искажений имеет

небольшую неточность, поскольку их оценка осуществляется по максимальному отклонению статической модуляционной характеристики (СМХ) от линейной зависимости, однако она не позволяет учесть амплитуду каждой составляющей спектра выходного сигнала. Кроме этого, приведенные аналитические выражения являются сложными, что неудобно для их практического применения.

Перспективным является метод определения нелинейных искажений, основанный на определении амплитуд гармоник выходного сигнала с использованием коэффициентов ряда Фурье по заданной вольтфарадной характеристике (ВФХ) управляющего элемента [6]. Это позволяет достаточно точно и просто достичь требуемых результатов, но полученные по этой методике результаты носят частный характер и не дают общей картины изменения нелинейных искажений от амплитуды управляющего сигнала и напряжения смещения. Для этого целесообразно выбрать варакторы, выпускаемые промышленностью [7] и выявить возможности реализации на их основе качественных характеристик (нелинейных искажений) в схемах базовых устройств.

При использовании ПАВ резонаторов и узкополосных фильтров, добротность и волновое сопротивление которых на порядок и более превышают аналогичные параметры генераторной части схемы, оптимальное значение ёмкости C_{y0} варактора VD1 в 5-10 раз меньше эквивалентной ёмкости контура, состоящей из C_1 , C_2 и C_3 (рис.1). Это позволяет пренебречь влиянием параметров элементов генераторной части схемы и существенно упростить расчетные соотношения.

Для получения расчетных соотношений используем следующую аппроксимацию ВФХ варактора [6]

$$C_y = C_{y0} \cdot \frac{\varphi_k - E_c}{\varphi_k - u}^\gamma, \quad (1)$$

где C_{y0} – ёмкость варактора при напряжении смещения E_c ; φ_k – контактная разность потенциалов (0,5 ... 0,7 В); γ – коэффициент нелинейности ВФХ: $\gamma = 0,5$ – резкий р-п-переход, $\gamma = 1$ – сверхрезкий р-п-переход.

С использованием разложения функции (1) в степенной ряд в виде полинома пятой степени по методике [10] для варакторов с резким р-п-переходом и при воздействии управляющего напряжения

$$u = E_c + U_F \cos 2\pi Ft + U_f \cos 2\pi f_0 t, \quad (2)$$

где U_F, F – амплитуда и частота управляющего сигнала соответственно; U_f, f_0 – амплитуда и несущая частота ВЧ сигнала, приложенного к варактору, девиация основной частот определяется выражением

$$\Delta f'_{m1} = 0,25 \frac{C_1 \cdot f_1}{C_{y0}} \cdot u_y + \frac{3}{32} u_y^3 + \frac{75}{3072} u_y^5, \quad (3)$$

где C_1 – динамическая ёмкость пьезорезонатора; f_1 – частота последовательного резонанса

пьезорезонатора (паспортная величина); $u_y = u/(\varphi_k - E_c)$.

Наряду с девиацией основной частоты (3), образуются и побочные продукты преобразования спектра, создающие два нежелательных вида искажений: смещение центральной частоты $\Delta f'_0$ и девиации частоты по второй $\Delta f'_{m2}$, третьей $\Delta f'_{m3}$, четвёртой $\Delta f'_{m4}$ и пятой $\Delta f'_{m5}$ гармоникам.

Сдвиг центральной частоты определяется соотношением

$$\Delta f'_0 = -0,25 \frac{c_1 f_1}{c_{y0}} \cdot 0,125 u_y^2 + \frac{30}{1536} u_y^4. \quad (4)$$

По полученным соотношениям для девиации частоты находятся выражения и для коэффициентов нелинейных искажений по гармоникам. При этом коэффициент нелинейных искажений по второй гармонике, определяется по формуле

$$K'_2 = 0,125 u_y + \frac{15}{384} u_y^3. \quad (5)$$

Коэффициент нелинейных искажений по третьей гармонике определяется выражением

$$K'_3 = \frac{u_y^2}{32} + \frac{75}{3072} u_y^4. \quad (6)$$

Коэффициент нелинейных искажений по четвёртой гармонике определяется по формуле

$$K'_4 = \frac{15}{1536} u_y^4. \quad (7)$$

Коэффициент нелинейных искажений по пятой гармонике определяется выражением

$$K'_5 = \frac{15}{6144} u_y^4. \quad (8)$$

Статическая модуляционная характеристика (СМХ), определяемая через ВФХ (1) и как разность между текущим значением частоты и ее средним значением на интервале перестройки

$$\Delta f' = f - f_{cp}', \quad (9)$$

где $f_{cp}' = 1/2\pi \sqrt{L_1 C_{k3}}$ – среднее значение частоты атоколебаний; L_1 – индуктивность контура автогенератора; C_{k3} – эквивалентная ёмкость контура автогенератора, состоящего из ёмкостей конденсаторов C_1, C_2, C_3 (рис.1) и ёмкости варактора VD1 C_{y0} с ВФХ (1).

Для варактора с резким р-п-переходом СМХ (9) представлена на рис. 2 для начального смещения $E_c = -6$ В.

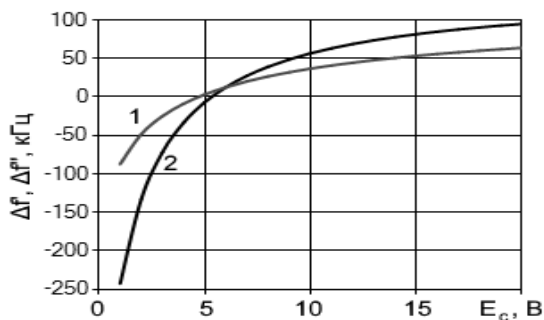


Рис. 2. СМХ: 1 – $\gamma = 0,5$; 2 – $\gamma = 1$

Девиация основной частоты $\Delta f'_m$, полученная для ПАВ резонатора с параметрами [11]: $f_1 = 303,825$ МГц, $C_1 = 0,0021$ пФ, $L_1 = 127,021$ мкГ, $C_0 = 2,3$ пФ, представлена на рис.3 (зависимости: 1 – $\gamma = 0,5$; 2 – $\gamma = 1$).

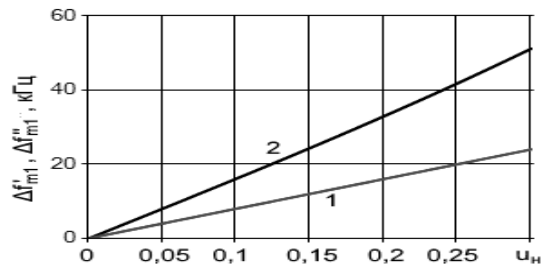


Рис. 3. Девиации основной частоты

Сдвиги центральной частоты представлены на рис. 4.

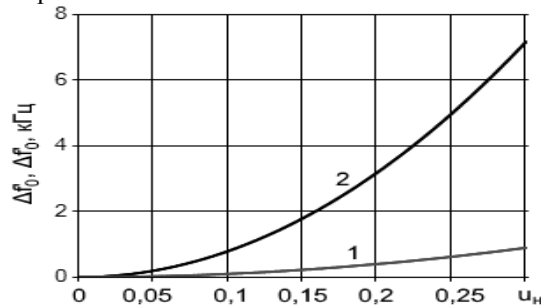


Рис. 4. Сдвиги центральной частоты

Коэффициенты нелинейных искажений K'_2, K'_3 представлены на рис. 5.

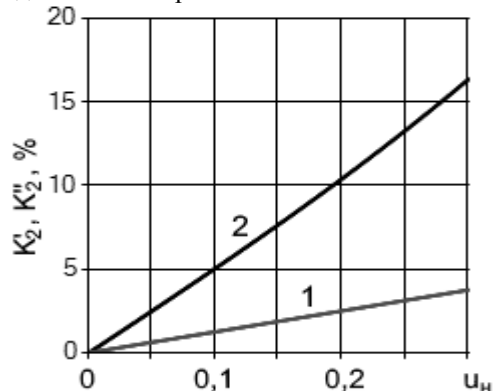


Рис. 5. Коэффициенты нелинейных искажений

Значения коэффициентов нелинейных искажений K'_4, K'_5 , полученные при $u_y = 0,3$ составляют соответственно, что во многих случаях их величиной можно пренебречь.

Значения коэффициентов нелинейности по второй и третьей гармоникам представлены на рис. 5 (1 – коэффициент K'_2 , 2 – коэффициент K'_3).

Для выявления влияния нелинейности ВФХ на качественные показатели, целесообразно рассмотреть и случай применения варактора со сверхрезким переходом ($\gamma = 1$). В этом случае девиация основной частоты определяется выражением.

$$\Delta f_{m1}'' = \frac{0,5c_1f_1}{c_{y0}} \cdot u_y + 0,75u_y^3 + \frac{5}{16}u_y^5. \quad (10)$$

Коэффициент нелинейных искажений по второй гармонике

$$K_2'' = 0,5u_y + \frac{25}{512}u_y^3. \quad (11)$$

Коэффициент искажений по третьей гармонике

$$K_3'' = 0,5u_y^2 + \frac{25}{512}u_y^3. \quad (12)$$

Коэффициент искажений по четвертой гармонике

$$K_4'' = 0,125u_y^3. \quad (13)$$

Коэффициент искажений по пятой гармонике

$$K_5'' = \frac{5}{512}u_y^4. \quad (14)$$

Для наглядности коэффициенты нелинейных искажений по второй и третьей гармоникам приведены на рис. 6 (1 – коэффициент K_3'' , 2 – коэффициент K_4'').

Из приведённых на рис. 3 и рис. 5 зависимостей следует, что для варактора с $\gamma = 0,5$ при $K_2' = 1\%$ девиация частоты $\Delta f_{m1}' = 6,1$ кГц, а

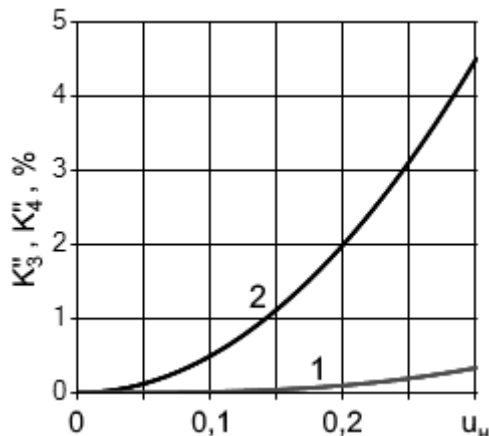


Рис. 6. Коэффициенты нелинейных искажений

при $K_2' = 5\%$ $\Delta f_{m1}' = 30,4$ кГц. Для варактора с $\gamma = 1$ при заданных нелинейных искажениях девиация частоты составила $\Delta f_{m1}'' = 4,3$ кГц и $\Delta f_{m1}' = 15,2$ кГц соответственно.

С целью выявления работоспособности исследуемого формирователя ЧМ сигналов и возможности его реализации проводилось схемотехническое моделирование с применением САПР Microwave Office. Исследовались СМХ, девиация основной частоты и другие параметры. При этом, уровень нелинейных искажений не

превышал -25 дБ, уровень фазовых шумов, измеренный при отстройке от основной частоты на $\Delta f = 1$ кГц, составил -98 дБ/Гц, а режимная нестабильность частоты при изменении напряжения питания на $\pm 5\%$ составила $1,3 \cdot 10^{-5}$.

Выводы

Проведенные моделирование и экспериментальные исследования ЧМ генераторов на ПАВ резонаторах и узкополосных фильтрах показали возможность получения ЧМ колебаний с малыми нелинейными искажениями и высокой спектральной чистотой выходного сигнала в диапазоне УВЧ без применения цепей коррекции модуляционных характеристик. При этом для управления частотой использовались варакторы с резким и сверхрезким р-п переходами.

Предложенная в работе методика определения нелинейных искажений и полученные результаты могут использоваться на этапе эскизного проектирования при разработке узкополосных информационно-телекоммуникационных систем и измерительных устройств.

Литература

1. Альтшуллер Г.Б. Кварцевые генераторы: справочное пособие /Г.Б. Альтшуллер, Н.Н. Елфимов, В.Г. Шакулин. – М.: Радио и связь, 1984. – 232с.
2. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации обработки сигналов: справ. пособие /В.В. Дмитриев, В.Б. Акламбеков, Е.Г. Бронникова и др.; под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.В. Дмитриева.–М.: Радио и связь, 1985. –276 с.
3. Рыжков А.В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи/А.В. Рыжков, В.Н. Попов. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
4. Дворников А.А. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах/А.А. Дворников, В.И. Огурцов, Г.М. Уткин.–М.: Радио и связь, 1983. – 236 с.
5. Петухов В.К. Фильтры, линии задержки и автогенераторы на поверхностных акустических волнах/В.К. Петухов, И.Г. Мальтер, О.П. Павловский//Радиотехника. 2006. -№3.-С.72-76.
6. Радиопередающие устройства /В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна.- М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.
7. Савченко М.П. Параметры эквивалентной схемы и аппроксимация характеристик УКВ варикапов /М.П. Савченко, Т.А. Королинская//Радиотехника. 1985. -№11.- С.24-27.
8. Соколинский В.Г. Частотные и фазовые модуляторы и манипуляторы/В.Г. Соколинский, В.Г. Шейкман. - М.: Радио и связь, 1983.- 192 с.
9. Пат. 2295825 РФ. Частотно-модулированный генератор /М.И. Бочаров // -2007. Бюл. -№ 8. – С. 7.
10. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов/ И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 651 с.
11. Сайт <https://www.angstrom.ru>

FM GENERATORS OF INFORMATION-TELECOMMUNICATION SYSTEMS APPLIED TO RESONATORS AND NARROW FILTERS ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

M.I. Bocharov¹, A.O. Ryzhov²

¹Ph.D, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: komandor20132013@mail.ru

²Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ryzhov777@yandex.ru

High demands are imposed nowadays on the frequency stability, the level of out-of-band and noise emissions, and manufacturability on the formers of radio signals in information-telecommunication systems. This is especially true for the UHF and microwave bands on which modern telecommunication systems operate. However, using the traditional method of transferring the frequency spectrum of quartz oscillators operates at relatively low frequencies to higher frequencies based on frequency multiplication results in a significant deterioration in the signal parameters. More promising is the use of FM generators applied surface waves (surfactors).

In this paper, a basic method for calculating the main types of nonlinear distortions that occur during the formation of FM radio signals is developed for the basic scheme of FM oscillators on SAW resonators for controlling the frequency of varactors operating in the barrier mode. The technique is based on the calculated ratios for the deviation of the fundamental frequency and its harmonics, the shift of the central frequency obtained using the static and dynamic modulation characteristics. Regimes are considered depending on the variation of the voltage amplitudes, control, high-frequency signals and bias voltage, which covers all possible modes of operation of the generators used in practice for varactors with sharp and super-sharp p-n junctions. This allows us to determine quickly and accurately the minimum levels of nonlinear distortions at the stage of preliminary design, based on the reference parameters of SAW resonators and used varactors.

The results of the carried out simulation and experimental studies indicate a sufficiently high accuracy of the coincidence of the calculation results and the experiment and the possibility of practical realization of the FM signal generators with small nonlinear distortions without the use of corrective circuits and the expediency of using the proposed technique in the sketch design. At the same time, by the level of noise radiation and the level of the output signal created directly by the self-oscillator, the investigated shaper significantly exceeds the parameters of the radio signals realized on the basis of quartz generators, which indicates the promise of its application in communication systems and measuring devices

Key words: SAW resonator, basic scheme, frequency deviation, varactor, central frequency shift, nonlinear distortions, modeling, experimental studies

References

1. Altshuller G.B., Elfimov N.N., Shakulin V.G., "Handbook on Quartz oscillators" ("Kvarcevye generatory: spravochnoe posobie"), M.: Radio and Communication (1984): 232 p.
2. Dmitryev V.V., Aklambekov V.B., Bronnikova E.G., "Handbook on integrated piezoelectric filtering devices for signal processing" ("Integralnye pezoelicheskieskie ustroystva filtrachii obrabotki signalov: spravochnoe posobie"), M.: Radio and Communication (1985): 276.
3. Ryzhkov A.V., Popov V.N., "Frequency synthesizers in radio communication" ("Sintezatory chastot v tekhnike radiosvyazi M.: Radio and communication"), M.: Radio and Communication (1991): 264.
4. Dvornikov A.A., Ogurchov V.I., Utkin G.M., "Stable generators with filters on surface acoustic waves" ("Stabilnye generatory s filtrami na poverhnostnykh akusticheskikh volnakh"), M.: Radio and Communication (1983): 236.
5. Petuhov V.K., Malter I.G., Pavlovsky O.P., "Delay line filters and automatic oscillators on surface acoustic waves" ("Filtry, linii zaderzhek i avtogeneratory na poverhnostnykh akusticheskikh volnakh"), M.: Radio Engineering 3 (2006): 72-76.
6. Shakhildya V.V., Kozyrev V.B., Lyahovkin A. A., "Radio-transmitting devices" ("Radioperedazhnie ustroystva"), M.: Radio and Communication (2003): 560.
7. Savchenko M.P., Korolinskaya T.A., "Parameters of the equivalent circuit and approximation of the characteristics of LW varicaps" ("Parametry ekvivalentnoy skhemy i approksimachii harakteristik UKV varikapov") M.: Radio Engineering 11 (1985): 24-27.
8. Sokolinsky V.G., Sheykman V.G., "Frequency phase modulators and manipulators" ("Chastotnie i fazovye modulyatory i manipulyatory"), M.: Radio and Communication (1983): 192 .
9. Bocharov M.I., "Frequency modulated generator" ("Chastotno-modulirovanny generator"), 8 (2007): 7.
10. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A., "Mathematics Handbook for Engineers and Graduates" "Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashihsya vuzov," M.: Science .-1980.- 651.
11. Web-site <https://www.angstrem.ru>

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ПОД УКРЫТИЕМ С ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПЛАЗМОЙ

А.В. Исайкин, О.А. Соколова

Рассмотрена способность зеркальной параболической антенны под радиопрозрачным обтекателем с поглощающей плазмой отражать электромагнитную волну. Предложена методика оценки снижения отражения электромагнитной волны от зеркальной антенны за счет поглощающих свойств плазмы. Методика основана на геометрикооптическом приближении. В качестве электродинамической модели реально возможных плазменных образований, создаваемых в закрытом объеме (под антенным укрытием), использовалась модель пространственно однородной плазмы. С помощью пространственно однородной плазмы моделировалось так называемое квазиоптимальное распределение концентрации электронов в плазме, обеспечивающей снижение отражательной способности антенны в заданном диапазоне длин волн. В отличие от известных ранее работ полученные в статье математические соотношения позволяют оценить степень снижения эффективной площади рассеяния зеркальной антенны в заданном диапазоне длин волн в зависимости от заданных для этого диапазона параметров плазменного образования

Ключевые слова: зеркальная параболическая антенна, радиопрозрачное укрытие, поглощающая плазма, снижение отражения электромагнитной волны, метод геометрикооптической оптики

Снижение отражательной способности антенн является сложной проблемой, решение которой необходимо при снижении радиолокационной заметности различных объектов, особенно летательных аппаратов, на которых эти антенны устанавливаются [1].

Одним из способов снижения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) антенны является применение поглощающей плазмы [2]. Такая плазма искусственно создается под антенным укрытием, которое на летательных аппаратах играет также роль обтекателя. На время излучения сигнала или приема отраженного от цели сигнала источник плазмы выключается, и среда под обтекателем становится радиопрозрачной. Эффективность этого способа подтверждена экспериментально [2]. Способы теоретической оценки снижения отражения электромагнитной волны от антенны, прикрытой поглощающей плазмой, развиты недостаточно.

В работе [3] рассмотрена оценка потенциально достижимых уровней уменьшения ЭПР бортовой фазированной антенной решетки (ФАР), прикрытой искусственно создаваемым поглощающим плазменным образованием. При этом рассматривались простейшие двумерные модели плазмы и ФАР в виде системы сосредоточенных отражателей. Задача решалась с использованием лучевого метода. Для зеркальных параболических антенн такая задача не решалась. Поэтому актуальным является рассмотрение теоретического способа оценки уменьше-

ния отражения электромагнитной волны от зеркальной антенны, размещенной в поглощающей плазме под укрытием (обтекателем).

Геометрия поставленной задачи изображена на рис. 1.

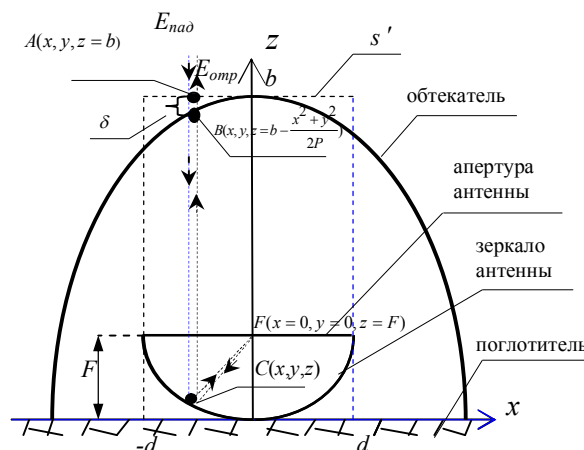


Рис. 1. Геометрия задачи

Решение такой задачи в строгой постановке представляет собой значительные трудности. Для упрощения примем ряд ограничений и допущений.

При решении задачи будем полагать, что обтекатель антенны является полностью радиопрозрачным, то есть имеет показатель преломления равный единице, как у внешней среды, окружающей этот обтекатель.

Для описания плазмы, заполняющей обтекатель, как и в [3] будем рассматривать модель пространственно однородной поглощающей среды. В качестве характеристики однородности (или неоднородности) будем рассматривать пространственное распределение диэлектрической проницаемости плазмы ϵ , которая явля-

Исайкин Александр Васильевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: avisa-ykin@inbox.ru.

Соколова Ольга Анатольевна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: sokolovaoa203@mail.ru.

ется функцией концентрации электронов N . Для поглощающей плазмы диэлектрическая проницаемость имеет вид [4]

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = 1 - \frac{N}{N_{кр}} - i \frac{N}{N_{кр}} \cdot \frac{v_{эф}}{\omega}, \quad (1)$$

где

$$N_{кр} = \frac{m(\omega^2 + v_{эф}^2)}{4\pi e^2} - \quad (2)$$

критическая концентрация электронов (при $N = N_{кр}$ действительная часть диэлектрической проницаемости ε' принимает значение, равное нулю); e , m – заряд и масса электрона; $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота электромагнитного поля;

$v_{эф}$ – эффективная частота столкновения электронов с другими частицами.

Для модели пространственно однородной поглощающей плазмы по всему объему под обтекатель будем рассматривать распределение концентрации электронов $N = const$. Возможность такого допущения аргументируем тем, что рассматриваемые плазменные образования будут обладать достаточно большими электрическими размерами. Кроме того уровень ослабления электромагнитной волны будет определяться интегральным эффектом поглощения и практически не будет зависеть от неравномерности распределения концентрации электронов, как это показано в [5], а будет определяться средним значением концентрации электронов N_{cp} на траектории распространения электромагнитной волны. Поэтому при решении задачи в модели однородной плазмы будем принимать значение концентрации электронов равное

$$N = N_{cp} = \frac{1}{L} \int_0^L N(l) dl, \quad (3)$$

где L – траектория распространения луча электромагнитной волны (одна из траекторий для падающей $E_{пад}$ и отраженной $E_{отр}$ волны изображена на рисунке 1); $N(l)$ – распределение концентрации электронов на траектории распространения луча электромагнитной волны; l – координата на траектории L .

При решении рассматриваемой задачи важным является определение самого значения концентрации электронов N для модели пространственно однородной поглощающей плазмы. Будем исходить из того, что моделируется реально возможное плазменное образование, в котором с удалением от источника плазмы в свободном пространстве концентрация элект-

ронов плавно убывает и на некотором удалении от источника приобретает значение, не влияющее на распространение электромагнитной волны. В большинстве случаев это убывание принимается пропорциональным квадрату расстояния [6]. В свободном пространстве при этом обеспечивается плавный вход облучающей электромагнитной волны в плазменное образование. Будем считать, что за счет размера обтекателя (на рисунке 1 он обозначен буквой b) и мощности источников плазмы, расположенных в основании антенны (при $z=0$), в моделируемой плазме под обтекателем также обеспечивается плавный вход облучающей волны $E_{пад}$ во всем рассматриваемом диапазоне длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$. При этом заметим, что для максимального использования поглощающих свойств плазмы на всей траектории распространения электромагнитной волны во всем рассматриваемом диапазоне длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$ должно выполняться условие $N < N_{кр}$. Допускается $N = N_{кр}$ только для λ_{max} при $z=0$.

Анализ реально возможных распределений концентрации электронов (например с квадратичной зависимостью убывания концентрации электронов) показал, что для модели пространственно однородной плазмы может быть принято значение $N = N_{cp} \ll N_{кр}(\lambda_{max})$, а порядок величины N может составлять

$$N = N_{cp} \sim N_{кр}(\lambda_{max}) \cdot 10^{-1} \frac{1}{cm^3}, \quad (4)$$

где $N_{кр}(\lambda_{max})$ – критическая концентрация электронов для наибольшей длины волны λ_{max} рассматриваемого диапазона длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$.

Принятая модель плазменного образования упрощает решение задачи. Однако к недостатку такой модели следует отнести то, что она не позволяет учитывать рефракционные свойства неоднородной плазмы. Это заведомо занизит получаемую оценку снижения мощности отраженной от антенны волны, поскольку не будут учитываться отклонение лучей облучающей волны от антенны. То есть будет получена оценка сверху, учитывающая только поглощающие свойства плазмы по снижению ЭПР антенны.

Уменьшение отражения электромагнитной волны оценим с использованием геометрико-оптического приближения.

Пусть зондирующий сигнал в виде плоской волны $E_{пад}$ распространяется параллельно оси z в направлении убывания координаты z .

Будем считать, что волна, прошедшая мимо антенны, достигая поверхности поглотителя (радиопоглощающего материала), обратно не отражается.

Оценку влияния поглощающей плазмы на отраженную электромагнитную волну проведем по распределению отраженного поля в некоторой плоскости S' , которая является касательной к обтеканию в его вершине (в точке b). Эта плоскость S' параллельна плоскости S (апертуре антенны) и равна ей по площади, то есть является ее ортогональной проекцией на параллельную плоскость. Решение для распределения поля на плоскости S' будем искать в виде [4;7]

$$E(\rho) = E_0 K e^{-k\Gamma(\rho)} \cdot e^{-ik\theta(\rho)}, \quad (5)$$

где $\rho = x^2 + y^2$ - координата в полярной системе координат $(\rho; \varphi)$ на плоскости S' ; E_0 - амплитуда падающей волны в плоскости S' (далее $E_0 = 1$); K - коэффициент отражения (переизлучения) волны облучателем антенны; $\Gamma(\rho)$ - распределение в плоскости S' показателя затухания электромагнитной волны с учетом распространения по траектории $L(\rho)$ [от точки

$A(x, y, z = b)$ к точке $B\left(x, y, z = b - \frac{x^2 + y^2}{2P}\right)$, от

точки $B\left(x, y, z = b - \frac{x^2 + y^2}{2P}\right)$ к точке

$C\left(x, y, z = \frac{x^2 + y^2}{2p}\right)$, от точки $C\left(x, y, z = \frac{x^2 + y^2}{2p}\right)$

до точки $F(x = 0, y = 0, z = F)$ и обратно тем же путем до точки $A(x, y, z = b)$]; $z = \frac{x^2 + y^2}{2p}$ - по-

верхность параболического зеркала антенны, p - параметр параболоида; $z = b - \frac{x^2 + y^2}{2P}$ - по-

верхность обтекателя в форме параболоида вращения с параметром P ; $\theta(\rho)$ - распределение в плоскости S' фазового пути (эйконала) электромагнитной волны, распространяющейся по траектории $L(\rho)$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число свободного пространства.

Показатель затухания $\Gamma(\rho)$ в плоскости S' определим с использованием выражения [4]

$$\Gamma(\rho) = \int_{L(\rho)} \chi(l) dl, \quad (6)$$

где

$$\chi(l) = \sqrt{-\frac{\varepsilon'(l)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon'(l)}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon''(l)}{2}\right)^2}} - \quad (7)$$

дифференциальный показатель затухания.

Для упрощения и наглядности решения задачи, выражение (7) упростим с использованием разложения Тейлора. Используя принятое допущение $\frac{N}{N_{кр}} \ll 1$, получим

$$\chi(l) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{эф}}{\omega} \cdot \frac{N(l)}{N_{кр}}. \quad (8)$$

Вычислив интеграл (6) по траектории $L(\rho)$, приняв $N(l) = 0$ на участке δ и $N(l) = N$ на остальных участках, получим

$$\Gamma(\rho) = \frac{v_{эф}}{\omega} \cdot \frac{N}{N_{кр}} \left(b + F - \frac{\rho^2}{2P} \right). \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что затухание волны будет зависеть от координаты ρ . Наибольшее затухание будет наблюдаться при распространении волны вдоль оси z . С удалением от оси z к периферии плоскости S' затухание будет убывать по квадратичному закону и достигнет своего минимального значения при $\rho = d$. Неравномерность распределения показателя затухания $\Gamma(\rho)$ будет зависеть от формы обтекателя. В данном случае она будет определяться параметром P . При больших значениях параметра P , когда выполняется условие

$$\frac{d^2}{2P} \ll b + F, \quad (10)$$

распределение показателя затухания $\Gamma(\rho)$ можно считать равномерным.

Распределение эйконала $\theta(\rho)$ в плоскости S' определим с использованием соотношения [4;7]

$$\theta(\rho) = \int_{L(\rho)} n(l) dl, \quad (11)$$

где $n(l)$ - действительная часть показателя преломления

$$\sqrt{\varepsilon(l)} = n(l) - i n'(l). \quad (12)$$

При принятом допущении $\frac{N}{N_{кр}} \ll 1$ находим

$$n(l) \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{N(l)}{N_{кр}}. \quad (13)$$

Вычислив интеграл в (11) по траектории $L(\rho)$, приняв $N(l) = 0$ на участке δ и $N(l) = N$ на остальных участках траектории, получим

$$\theta(\rho) = (b + F) \cdot \left(2 - \frac{N}{N_{кр}} \right) + \frac{N}{N_{кр}} \cdot \frac{\rho^2}{2P}. \quad (14)$$

Отбросив постоянный набег эйконала для всех координат ρ плоскости S' , определим его неравномерную часть

$$\theta(\rho) = \frac{N}{N_{кр}} \cdot \frac{\rho^2}{2P}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что наименьшее значение эйконала соответствует координате $\rho = 0$. С увеличением координаты ρ значение эйконала увеличивается и достигает своего максимального значения на краях плоскости S' .

Аналогичная зависимость будет присуща и для распределения фазы

$$\Phi(\rho) = k\theta(\rho). \quad (16)$$

В соответствии с методом стационарной фазы [8] из условия $d\Phi(\rho)/d\rho = 0$ находим, что в центре плоскости S' (при $\rho = 0$) будет наблюдаться так называемая «блестящая точка». «Яркость» такой «блестящей точки», как следует из выражения (15), будет зависеть от параметра P параболоида вращения, описывающего поверхность обтекателя. Об уменьшении отражательной способности антенны с помощью поглощающей плазмы под обтекателем можно будет судить по полю в дальней зоне, создаваемому этой «блестящей точкой».

Для качественной оценки можно отметить, что характер «блестящей точки», определяющей мощность отраженного поля, будет зависеть от формы обтекателя. Выбирая соответствующую форму обтекателя можно также снижать ЭПР антенны. В данной статье этот вопрос рассматриваться не будет, а будет акцентироваться внимание только на возможностях поглощающих свойств плазмы по снижению ЭПР антенны. Для этого рассмотрим случай, когда с увеличением параметра P будет выполняться условие $\Phi(\rho = d) - \Phi(\rho = 0) \ll 2\pi$, то есть

$$\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{N}{N_{кр}} \cdot \frac{d^2}{2P} \ll 1. \quad (17)$$

При выполнении условия (17) «блестящая точка» «расплывается» до такой степени, что «блестеть» будет вся поверхность S' , так как распределение фазы в плоскости S' можно будет считать равномерным. В этом случае распределение отраженного поля в плоскости S' в соответствии с выражениями (9) и (10) можно представить в виде

$$E = K e^{-kQ}, \quad (18)$$

где

$$Q = \frac{v_{эф}}{\omega} \cdot \frac{N}{N_{кр}} (b + F). \quad (19)$$

Соответственно распределение плотности потока мощности будет характеризоваться соотношением

$$P = K^2 e^{-2kQ}. \quad (20)$$

Тогда, если ЭПР зеркальной антенны без плазменного образования будет иметь значение σ_0 , а ЭПР этой антенны с плазменным образованием снизится до значения σ , то степень снижения ЭПР можно будет оценить по формуле

$$q = \frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-2kQ}. \quad (21)$$

Из анализа выражений (19) и (21) следует, что наибольшая степень снижения ЭПР q будет достигаться только в том случае, когда параметры плазменного образования N и $v_{эф}$ имеют некоторые оптимальные значения. Для эффективной частоты столкновения $v_{эф}$ оптимальные значения находятся из известного равенства $v_{эф} = \omega$ [4;5]. Если вместо точного равенства выполняется равенство по порядку величин $v_{эф} \sim \omega$, то такое значение $v_{эф}$ считают квазиоптимальным.

Об оптимальности значения концентрации электронов N можно говорить только для одной фиксированной длины волны, как это показано выше. Если рассматривать диапазон длин волн $\lambda = \lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$, то оптимальное значение N можно установить только для максимальной длины волны $\lambda_{\max}$ в соответствии с соотношением (4). Для остальных длин волн эта концентрация электронов N будет не оптимальной. Покажем это на примере, проведя оценку снижения ЭПР антенны в разных полосах длин волн в диапазоне $\lambda = 3\text{см} \dots 30\text{см}$.

Оценка степени снижения ЭПР антенны проводилась по формуле (21) с использованием следующих исходных данных: $b + F = 150\text{см}$; $v_{эф} \sim 10^{10} \text{Гц}$ (эффективная частота столкновения квазиоптимальна для диапазона длин волн $\lambda = 3\text{см} \dots 30\text{см}$, при давлении под обтекателем 20 Торр [3]). Оценка проводилась для трех полос длин волн: $\lambda_1 = 3\text{см} \dots 30\text{см}$; $\lambda_2 = 3\text{см} \dots 15\text{см}$; $\lambda_3 = 3\text{см} \dots 10\text{см}$ и для одной фиксированной длины волны $\lambda_4 = 3\text{см}$. Им соответствовали концентрации электронов модели однородной плазмы:

$$N = N_1 = 5,9 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{см}^3}; N = N_2 = 9,5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$N = N_3 = 1,5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{см}^3}; N = N_4 = 1,2 \cdot 10^{11} \frac{1}{\text{см}^3}.$$

Результаты оценок степени снижения ЭПР антенны в зависимости от длины облучаемой волны для различных значений $N = N_1; N_2; N_3; N_4$, соответствующих выбран-

ным для снижения ЭПР полосам длин волн, представлены на рис. 2.

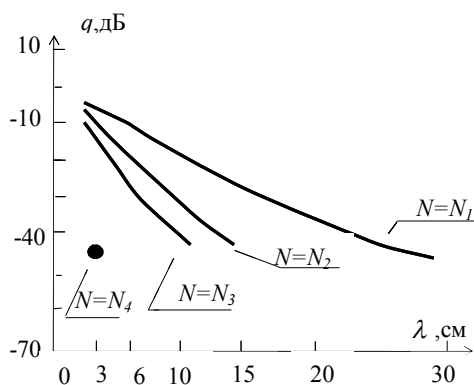


Рис. 2. Снижение ЭПР зеркальной антенны

Из рассмотренного примера следует, что:

- поглощающие свойства плазмы позволяют получить значительное снижение ЭПР антенны, которое имеет явно выраженную зависимость от длины облучающей волны;

- для заданного значения концентрации электронов $N = N_{кр}(\lambda_{max}) \cdot 10^{-1}$, соответствующего полосе длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$, наибольшего снижения ЭПР антенны можно получить только для длины волны λ_{max} , которое может достигать значения $q < -40$ дБ;

- для всех облучающих длин волн $\lambda < \lambda_{max}$ концентрация электронов $N = N_{кр}(\lambda_{max}) \cdot 10^{-1}$ для поглощения электромагнитной волны будет неоптимальной, и степень снижения ЭПР будет падать с уменьшением длины волны;

- увеличить степень снижения ЭПР в диапазоне длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$ за счет увеличения концентрации электронов $N = N_{кр}(\lambda_{max}) \cdot 10^{-1}$ не представляется возможным, поскольку это нарушит правила формирования модели пространственно однородной плазмы, приведет к поднятию критической концентрации электронов $N_{кр}$ в моделируемой плазме выше уровня $z=0$ для длинноволновой части диапазона длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$ и к сокращению траектории L с эффективным поглощением электромагнитной волны (то есть

диапазон длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$ с эффективным уменьшением ЭПР сократится);

- увеличение снижения ЭПР возможно при сокращении диапазона длин волн $\lambda = \lambda_{min} \dots \lambda_{max}$.

В пределе, когда рассматривается не диапазон длин волн, а фиксированная длина волны, например, $\lambda = 3$ см, можно также получить максимальное снижение ЭПР $q < -40$ дБ, при $N = N_{кр}(\lambda = 3 \text{ см}) \cdot 10^{-1}$, как и для λ_{max} в диапазоне длин волн.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить снижение отражательной способности зеркальной антенны в заданном диапазоне длин волн за счет использования поглощающих способностей плазменных образований, формируемых под радиопрозрачным укрытием этой антенны.

Литература

1. Radar cross section handbook / G.T. Ruck, D.E. Barrick, W.D. Stuart, C.K. Krichbaum // London: Plenum press. – 1970. - Vol.1-2.
2. Способ снижения радиолокационной заметности объекта, оборудованного, по меньшей мере, одной антенной / А.И. Головин, А.С. Коротеев, Е.Н. Ломакин, А.И. Шлойдо, О.К. Таушканов // Патент РФ №2469447. 10.12.2012. Патентообладатель: ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».
3. Авдеев В.Б. Достижимые уровни уменьшения эффективной площади рассеяния бортовой фазированной антенной решетки, прикрытой поглощающим плазменным образованием / В.Б. Авдеев, К.П. Пискунов // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2001. - № 11. - С. 29-34.
4. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург В.Л. – М.: Наука, – 1967. - 683 с.
5. Авдеев В.Б. Достижимые уровни уменьшения коэффициента отражения радиоволн от аэродинамического объекта, прикрытого поглощающим плазменным образованием / В.Б. Авдеев В.Б. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1999. - № 9. - С. 893-899.
6. Соколова О.А. Рассеяние электромагнитной волны на радиально неоднородном плазменном образовании с угловыми флуктуациями концентрации электронов / О.А. Соколова О.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2003. - Т. 6. - № 2. - С. 88-91.
7. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный Ф.Б. Изд. 2-е? доп. и перераб. – М.: Сов. радио, – 1972. - 464 с.
8. Эрдейи А. Асимптотические разложения / А. Эрдейи А. пер. с англ. Н.Я. Виленькина. – М.: Гос. Изд. ФМЛ, - 1962. - 127 с.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

METHODOLOGY FOR EVALUATING THE REFLECTIVE CAPACITY OF MIRROR ANTENNA WITH ABSORBING PLASMA, LOCATED UNDER THE SHELL

A.V. Isaykin¹, O.A. Sokolova²

¹Ph.D., Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russian Federation
e-mail: avisaykin@inbox.ru.

²Ph.D., Associate Professor, Voronezh state technical university, Voronezh, Russian Federation
e-mail: sokolovaoa203@mail.ru

The ability of a mirror parabolic antenna under a radio-transparent fairing with absorbing plasma to reflect an electromagnetic wave is reviewed in the article. A technique for estimating the reduction of the reflection of an electromagnetic wave from a mirror antenna due to the absorbing properties of the plasma is proposed. The method is based on the geometric-optic approximation.

Spatially homogeneous plasma model was used for the electro-dynamic model of possible plasma formations created in a closed volume (under the antenna shelter). The so-called quasi-optimal distribution of the electron density in the plasma, which reduces the reflectivity of the antenna in a given wavelength range, was constructed with the help of a spatially homogeneous plasma. In contrast to the previously known research, the mathematical relationships introduced in the article makes it possible to estimate the degree of reduction of the effective scattering area of a mirror antenna in a given range of wavelengths depending on the parameters of plasma

Key words: mirror parabolic antenna, radio-transparent shelter, absorbing plasma, reduction of reflection of an electromagnetic wave, method of geometrically optic optics

References

1. Ruck G.T., Barrick D.E., Stuart W.D., Krichbaum C.K., “*Radar cross section handbook*,” London: Plenum press, 1-2 (1970)
2. Golovin A.I., Koroteev A.S., Lomakin E.N., Shloydo A. I., Taushkanov O.K., “*Methodology for reducing the radar visibility of the object equipped with at least one antenna*” (“*Sposob snizheniy radiolokacionnoi zametnosti obiekta, oborudovannogo, po menchey mere, odnoy antennoy*”), RF patent number 2469447. 10.12.2012. Patentee: SSC FSUE “Keldysh research Center”.
3. Avdeev V.B., Piskunov K.P., “*Achievable levels of reduction of the effective area of the scattering side of the phased array covered with absorbing plasma formation*” (“*Dostizhimie urovni umencheniy effektivnoy ploshadi rasseyaniy bortovoy fazirovannoy antennoy reshotki, prikritoy pogloshaushim plazmennim obrazovaniem*”), *Izvestiya vuzov. Electronics*, 11 (2001): 29-34.
4. Ginzburg V.L., “*The propagation of electromagnetic waves in plasmas*” (“*Rasprostranenie elektromagnitnich voln v plazme*”), *Science* (1967): 683.
5. Avdeev V.B., Piskunov K.P., “*Achievable levels of reduction of the coefficient of reflection of radio waves from the aerodynamic object covered with an absorbing plasma formation*” (“*Dostizhimie urovni umencheniya koeffizienta otrazheniya radiovoln ot aerodinamicheskogo obekta, prikritogo pogloshaushim plazmennim obrazovaniem*”), *Izvestiya vuzov. Radio* 9 (1999) 893-899.
6. Sokolova O.A., Yarygin A.P., “*Scattering of electromagnetic waves in a radially inhomogeneous plasma formation with angular fluctuations of the electron concentration*” (“*Rasseyaniye elektromagnitnoy volni na radialno neodnorodnom plazmennom obrazovanii s uglovimi fluctuatsiyami konchentrachii elektronov*”) *Physics of wave processes and Radiotechnical systems* 6-2 (2003): 88-91.
7. Black F.B., “*The propagation of radio waves*”, (“*Rasprostranenie radiovoln*”), Ed. 2nd Rev. and DOP. – M: Owls. Radio (1972): 464.
8. Erdelyi A., “*Asymptotic expansions*” (“*Asimptoticheskie razlozheniya*”), M: GOS. Ed. FML (1962): 127.

МАКРОМОДЕЛЬ СТАБИЛИТРОНА С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Осыкин, А.В. Русанов, Ю.С. Балашов

В статье рассматриваются недостатки стандартной модели стабилитрона путём анализа её вольт-амперных характеристик в сравнении с характеристиками тестового стабилитрона в прямом и обратном смещении p-n перехода. За критерий точности моделирования принималась величина среднеквадратической ошибки отклонения. Предлагаемая макромодель стабилитрона повышает точность стандартной макромодели с помощью введения в под схему встроенных SPICE моделей приборов, каждый из которых отвечает за определённый участок ВАХ и в целом позволяет моделировать стабилитрон во всём диапазоне рабочего напряжения. Подробно рассмотрено моделирование наиболее критичной для стабилитрона области пробоя ВАХ и участка характеристики после пробоя. В работе приведена методика экстракции статических параметров Agilent Technologies для учёта эффектов, отклоняющих характеристику от идеальной: рекомбинационного тока, высокого уровня инжекции. Проведённый в работе заключительный анализ позволяет оценить целесообразность использования макромодели, устанавливает её достоинства и недостатки, а также возможность её дальнейшего усовершенствования и модификации для практического применения в области разработки полупроводниковых интегральных схем. Главное достоинство предлагаемой макромодели – готовое решение для использования в любой программе схемотехнического моделирования, поддерживающей SPICE синтаксис

Ключевые слова: SPICE модель, стабилитрон, макромодель, экстракция параметров

I. Введение

SPICE моделирование является мощным инструментом для анализа поведения ИС, а точность моделирования приборов в её составе напрямую влияет на достоверность проводимого анализа. Для фаблесс-компаний точность анализа зависит от точности SPICE моделей предоставленных фабрикой изготовителем ИС, которые удовлетворительно описывают поведение прибора строго в заданных условиях. Относительно рассматриваемой в статье макромодели стабилитрона, повышенная точность моделирования может требоваться: во время работы при токе отличным от тока стабилитрона, установленного в спецификации; при важности динамических характеристик стабилитрона [1].

II. Стандартная модель стабилитрона

Программа моделирования SPICE3 не имеет встроенной модели стабилитрона, поэтому часто стабилитрон моделируют под схемой представленной на рис. 1. Подсхема включает в себя диод D1 для моделирования тока в прямом направлении, источник напряжения VZ для моделирования пробивного напряжения последовательно с диодом DZ1, моделирующим наклон характеристики после пробоя. Для определения ограничений используемой модели разобьём ВАХ прямой и обратной ветви на области. Область I прямой ВАХ (рис. 2) характеризует рекомбинационный ток, доминирующий при малых напряжениях смещения, область II - область идеального диода, область III - характеризует область влияния высокого уровня инжекции в перехо-

де и область IV – омический участок характеристики.

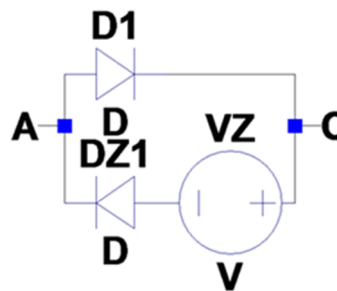


Рис. 1. Стандартная макромодель стабилитрона

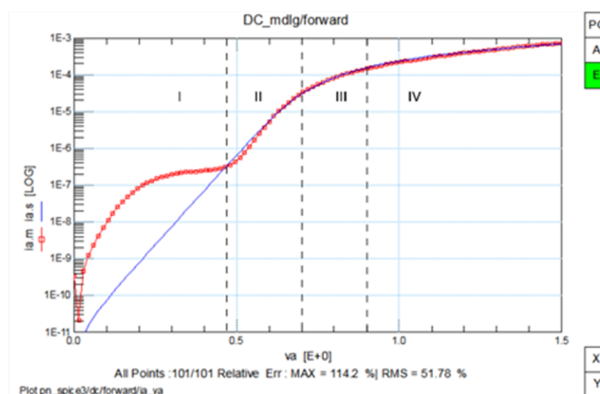


Рис. 2. Прямая ветвь ВАХ стабилитрона

Обратная ветвь (рис. 3) делится на область I до напряжения пробоя, область II после пробоя и область III после максимального тока стабилизации, после которой стабилитрон перестаёт выполнять свою функцию по поддержанию напряжения.

Осыкин Андрей Александрович - АО «НИИЭТ», инженер-технолог, e-mail: osykin@mail.ru
 Русанов Александр Валерьевич - АО «НИИЭТ», канд. техн. наук, инженер-конструктор, e-mail: ralval@rambler.ru
 Балашов Юрий Степанович - ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: faddey52@mail.ru

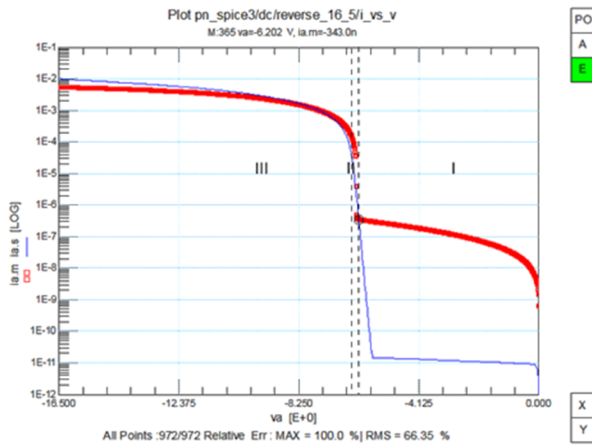


Рис. 3. Обратная ветвь BAX стабилитрона

На вышеприведённых рисунках результаты моделирования показаны сплошной линией, а линией маркеров - результаты электрических измерений стабилитрона в составе ИС AD7841 фирмы Analog Devices, представляющий собой 14-разрядный ЦАП с максимальным напряжением питания плюс/ минус 16,5 В. Как видно из графиков существует значительное расхождение между BAX, которое можно сформировать как список проблем:

1) Ток диода в прямом включении описывается уравнением

$$I_D = IS \cdot \left\{ \exp\left(\frac{V_D}{N \cdot V_t}\right) - 1 \right\} + GMIN \cdot V_D, \quad (1)$$

где IS - ток насыщения, N - коэффициент эмиссии. Подобное описывает ток идеального диода и не учитывает ток рекомбинации.

2) Невозможность должного моделирования обратного тока утечки до пробоя, определяющегося как

$$I_D = -IS + GMIN \cdot V_D, \quad (2)$$

где $GMIN$ - очень малая проводимость (порядка 10^{-12} См), делающая второе слагаемое пренебрежимо малым. Изменения же IS влияют на форму прямой характеристики.

3) Омическое сопротивление RS является константой и не зависит от приложенного напряжения. В действительности сопротивление нейтральной области полупроводника повышается с увеличением тока и носит нелинейный характер. Отличие заметно в области III обратной ветви BAX.

III. Макромодель стабилитрона

Предлагаемая макромодель расширяет ранее предложенные подходы описания работы стабилитрона [2], [3] для работы в диапазоне обратного напряжения после пробоя (рис. 4).

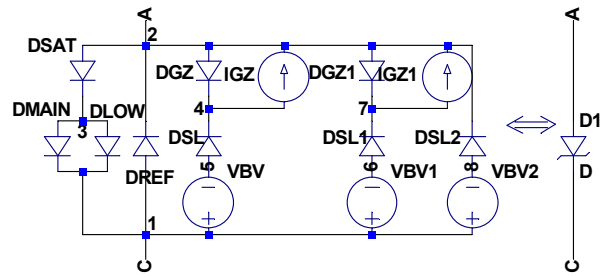


Рис. 4. SPICE макромодель стабилитрона

А. Прямая ветвь BAX

Прямая ветвь BAX (рис. 5) моделируется соединением трёх диодов: параллельным DMAIN и DLOW, описывающих ток идеального диода и ток рекомбинации в ОПЗ эмиттерного перехода соответственно и последовательно к ним DSAT, описывающий эффект модуляции сопротивления базы. Руководствуясь описанием методики экстракции параметров диода Agilent Technologies [4], [5], получим параметры IS , N путём выделения линейного участка на BAX в логарифмических координатах в соответствующей для каждого из диодов области и аппроксимированием этого участка линейной функцией вида

$$y = b + m \cdot x, \quad (3)$$

где $y = \lg I_D$, $b = \lg IS$, $m = \frac{1}{\ln 10 \cdot N \cdot V_t}$.

Через найденные коэффициенты b и m выражаем параметры IS и N . Отклонение характеристики от линейной корректируется выбором последовательного сопротивления RS .

Б. Обратная ветвь BAX

До напряжения пробоя ток утечки обратной BAX (рис. 6) моделируется диодом DREV.

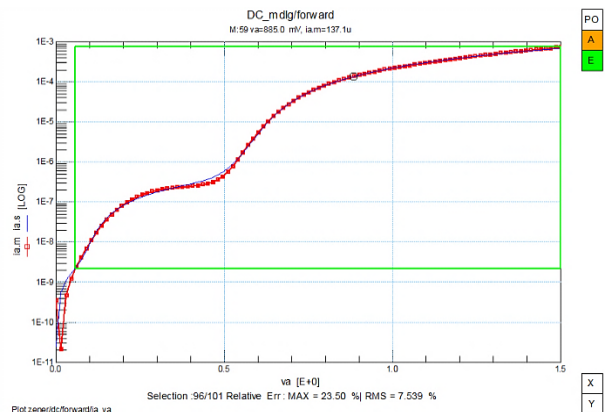


Рис. 5. Прямая ветвь BAX предлагаемой SPICE макромодели стабилитрона

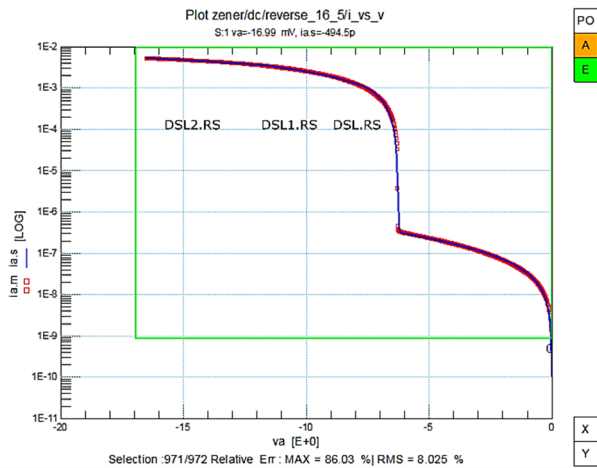


Рис. 6. Обратная ветвь BAX предлагаемой SPICE макромодели стабилитрона

Экстракция параметров IS , N , RS для этого диода аналогична методике экстракции параметров диодов моделирующих прямую ветвь BAX. Ветвь содержащая диод DSL используется для моделирования области II и начальный наклон характеристики в области III обратной ветви BAX. Если обратное напряжение превышает напряжение источника VBВ, то диод DSL включается, моделируя пробой стабилитрона.

Номинал напряжения пробоя V_Z задаётся величиной напряжения VBВ, которая определяется как

$$VBВ = V_Z - V_{D,RS}. \quad (4)$$

Параметры IS , N диода DSL определяют наклон характеристики в режиме стабилизации, определяемый как проводимость диода DL в прямом смещении

$$GD = \left(\frac{IS}{N \cdot V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_D}{N \cdot V_t} \right), \quad (5)$$

а последовательное сопротивление RS задаёт величину максимального тока стабилизации и последующий наклон характеристики. Для обеспечения возможности изменения наклона характеристики, вводится пара - диод DGZ с параллельным ему источником тока IGZ. Когда ток ветви становится больше установленного тока IGZ, диод DSL смещается в обратное направление, ограничивая тем самым ток ветви. Напряжение достижения ограничения устанавливает величину источника напряжения следующей ветви:

$$V_{DSL1} = V(IGZ). \quad (6)$$

В зависимости от требуемой точности, возможно увеличить количество параллельных ветвей, используемых для изменения наклона характеристики, посредством изменения параметра RS диодов DSL и величин источников VBВ и IGZ.

В. ВФХ стабилитрона

Малосигнальные параметры стабилитрона моделируются путём установления параметров CJO , M , VJ , FC модели диода DMAIN (рис. 7)

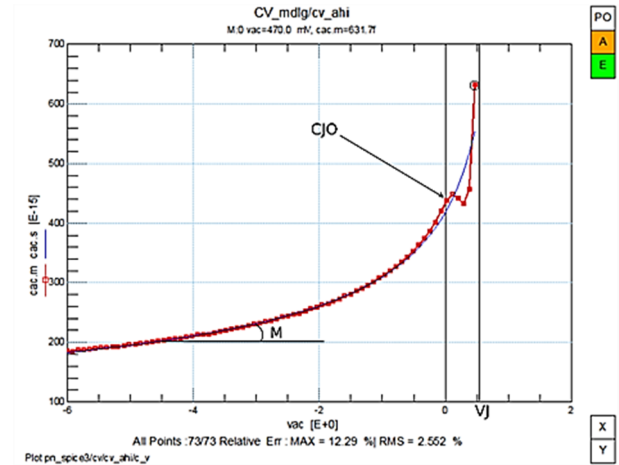


Рис. 7. ВФХ стабилитрона

При обратном напряжении

$$V_D < FC \cdot VJ, \quad (7)$$

где FC – коэффициент, влияющий на ёмкость перехода в прямом смещении, в используемом методе равный 0,5, VJ – контактная разность потенциалов, ёмкость перехода определяется выражением:

$$CJ = CJO \cdot \left\{ 1 - \frac{V_D}{VJ} \right\}^{-M}, \quad (8)$$

где CJO – ёмкость перехода при нулевом смещении, M – показатель наклона характеристики. Экстракция параметров CJO и M методом линейной регрессии, путём трансформации выражения для CJ к виду:

$$ylin = b + m \cdot xlin, \quad (9)$$

где $ylin = \ln(CJ)$, $b = \ln(CJO)$, $m = -M$,

$xlin = \ln\left(1 - \frac{V_D}{VJ}\right)$, вычислением параметров CJO , M

по найденным коэффициентам b и m [6].

IV. Результаты

Тестовые измерения проводились на зондовой станции Cascade Summit 11000B-M соединённой с анализатором Agilent B1505A, включающим модули HPSMU и MFCMU. Экстракция параметров макромодели проводилась в САПР Agilent IC-CAP 2010 с внутренним симулятором UCB SPICE 3E2. Параметры моделей извлекались с использованием программ на языке PEL (Parameter Extraction Language) и точной оптимизацией графиков, в том числе и с использованием встроенных оптимизационных алгоритмов. Результаты отражены в нетлисте:

* Влияние контактного сопротивления
.SUBCKT DC_CONT_LOSS 2 1
R_ser1.R 1 11 3

```

R_ser2.R 2 22 3
X1 22 11 ZENER
.ENDS
* Подсхема стабилитрона
.SUBCKT ZENER 2 1
* Модели SPICE элементов
.MODEL DMAIN D IS = 3.671E-014 N = 1.209
+ RS = 762.7 CJO = 4.377E-013 VJ = 1 M = 0.5
+ FC = 0.5
.MODEL DLOW D IS = 7.061E-012 N = 0.4431
+ RS = 1E+006
.MODEL DSAT D IS = 0.0001642 N = 4.828
.MODEL DREF D IS = 1.937E-007 N = 249.5
+ RS = 2.2E+007
.MODEL DSL D IS = 1E-015 N = 0.7745
+ RS = 4.441E-14
.MODEL DGZ D IS = 6.607E-007 N = 1.4
.MODEL DSL1 D RS = 1576
.MODEL DSL2 D RS = 2625
* Прямая ветвь BAX
DMAIN 3 1 DMAIN
DLOW 3 1 DLOW
DSAT 2 3 DSAT
* Ток утечки до пробоя
DREF 1 2 DREF
* Напряжение пробоя и наклон характеристики
* DSL.RS
VBV 1 5 6.1
DSL 5 4 DSL
DGZ 2 4 DGZ
IZG 4 2 0.001074
* Омический участок обратной характеристики
* с наклоном DSL1.RS
VBV1 1 6 7.318
DSL1 6 7 DSL1
DGZ1 2 7 DGZ
IZG1 7 2 0.002763
* Омический участок обратной характеристики
* с наклоном DSL2.RS
VBV2 1 8 11.76
DSL2 8 2 DSL2
.ENDS

```

Высокое контактное сопротивление, моделируемое подсхемой DC_CONT_LOSS, обусловлено контактированием непосредственно к шинам металлизации исследуемого стабилитрона (рис. 8).

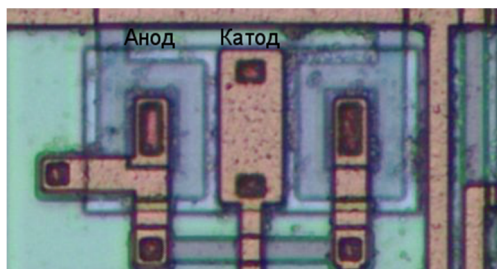


Рис. 8. Стабилитрон в составе ИС AD7841

В сумме, результаты сравнения стандартной макромоделю стабилитрона и предложенной макромоделю следующие:

1) Моделирование рекомбинационных токов, эффекта высокого уровня инжекции, обратного тока утечки, омической области в обратном смещении после напряжения пробоя;

2) Увеличение точности моделирования прямой ветви ВАХ до значения среднеквадратического отклонения менее 10 % для прямой и обратной ВАХ;

3) Незначительное увеличение времени моделирования с 96 мс до 112 мс (тест в симуляторе LTspice) позволяет использовать макромоделю без необходимости увеличения требований к ресурсам компьютера;

4) Из-за сложности установления контакта к выводам стабилитрона, предложенная макромоделю была протестирована только при комнатной температуре, однако её легко расширить для учёта влияние температуры на величину напряжения пробоя стабилитрона и обратного тока утечки путём выделения резисторов из диодов DSL и DREF с указанием для них параметров TC (температурный коэффициент сопротивления);

5) Макромоделю не учитывает паразитные ёмкости и сопротивления моделирующие диэлектрические потери в диоде.

V. Заключение

В работе предложена макромоделю стабилитрона с повышенной точностью моделирования. Рассмотрена методика моделирования, проведён подробный анализ полученных результатов. Макромоделю будет полезна при разработке и исследовании схем, для которых стабилитрон играет критичную роль в обеспечении их надёжности и правильности функционирования.

Литература

1. Steven M Sandler. SPICE Subcircuit Accurately Models Zener Characteristics / Steven M Sandler // Personal Engineering. Analytical Engineering Inc. 1998.
2. Charles Hymowitz. SPICE Macro Model for the Simulation of Zener Diode Current-Voltage Characteristics/ H. Charles // Circuits & Devices. Intusoft. 1991.
3. Jim Lepkowski. Evaluation TVS Protection Circuits with SPICE / Jim Lepkowski, William Lepkowski // Power Electronics Technology. ON Semiconductor, Phoenix, 2006.
4. IC-CAP Modeling Handbook // Agilent Technologies Inc. 2010.
5. Мокеев А.С. Масштабируемая макромоделю диода с повышенной точностью моделирования / А.С. Мокеев, А.Н. Мансуров, А.П. Ятманов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2014. – С. 89-94.
6. Howard T. Russel The SPICE Diode Model / T. Howard // Three. OPAL Engineering Inc. 1991

SPICE MODEL OF STABILITRON WITH INCREASED ACCURACY MODELING

A.A. Osykin¹, A.V. Rusanov², Y.S. Balashov³

¹Engineer, Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation
e-mail: osaa@niiet.ru

² Ph.D., Design Engineer, Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ralval@rambler.ru

³Ph.D., Professor, Director of department "Radio electronical devices and systems", Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: faddey52@mail.ru

The shortcomings of the standard model of the zener diode are analyzed in the paper, by reviewing its current-voltage characteristics in comparison with the characteristics of the measured zener diode in the forward and reverse bias of the p-n junction. The standard deviation error was taken as the criterion of modeling accuracy. The proposed zener diode macro model improves the accuracy of the standard macro model by introducing into the subcircuit the built-in SPICE models, for responsible for a certain portion of the IV characteristic, and, in general, allows setting of the zener diode over the entire operating voltage range.

The modeling of the breakdown area most critical for the zener diode is reviewed in detail. In this paper, the method of extraction of the static parameters of Agilent Technologies is provided to illustrate the effects of the current recombination and high level of injection. The final analysis allows us to assess the feasibility of using the macro model, to determine its advantages and disadvantages, and also to make it possible for practical application in the field of semiconductor integrated circuit design. The main advantage of the proposed macro model is a ready-made solution for use in any schematic simulation program supporting SPICE syntax

Key words: SPICE model, zener diode, macro model, SPICE parameters extraction

References

1. Sandler, M. Steven, "SPICE Subcircuit Accurately Models Zener Characteristics", Personal Engineering. Analytical Engineering Inc (1998).
2. Hymowitz Charles, "SPICE Macro Model for the Simulation of Zener Diode Current-Voltage Characteristics", Circuits & Devices. Intusoft (1991).
3. Lepkowski Jim, Lepkowski William, "Evaluation TVS Protection Circuits with SPICE," Power Electronics Technology. ON Semiconductor, Phoenix (2006).
4. "IC-CAP Modeling Handbook," Agilent Technologies Inc. (2010).
5. Mokeyev A.S., Mansurov A.N., Yatmanov A.P., "Scalable diode macromodel with high modeling accuracy" ("Masshtabi-ruemaya makromodel' dio-da s povyshennoj tochnos'yu modelirovaniya"), Problems of advanced micro- and nano electronic systems development (MES) (2014): 89-94.
6. Russel T. Howard T., "The SPICE Diode Model," Three. OPAL Engineering Inc. (1991).

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ ТИТАНА

В.В. Пешков, А.Б. Булков, С.М. Ларсов

В данной статье описано влияние наличия и толщины слоя с мелкозернистой структурой на механические свойства диффузионно-сварных соединений. Появление этого слоя обусловлено рекристаллизацией в условиях сварки металла, подвергнутого деформации в процессе предварительной механической обработки. Глубина слоя с достаточной для рекристаллизации степенью деформации зависит от вида предварительной обработки и составляет от 8–10 мкм при шлифовании до 25 мкм при точении.

Исследования проводили на образцах из сплава ОТ4 с исходной крупнозернистой структурой. Контактные поверхности образцов подвергали механической обработке. Далее образцы делили на две партии в зависимости от вида обработки перед сваркой. Первая подвергалась сварке непосредственно после механической обработки, что приводило к образованию зоны мелкозернистого материала на границе раздела заготовок в процессе сварки. Вторая перед сваркой подвергалась вакуумному отжигу при 975 °С (выше температуры полиморфного превращения) для устранения влияния наклепа. Обе группы образцов сваривали при температурах 800–1000 °С и давлении 5 МПа, которое прикладывалось при достижении температуры сварки.

Экспериментальные исследования показали, что прочностные характеристики сварных соединений образцов первой группы в интервале исследованных температур и времени сварки (до температуры полиморфного превращения) имеют более высокие показатели прочности по сравнению с образцами второй группы.

Топография поверхностей разрушения сварных соединений показывает, что образцы первой группы в изломе имеют развитый рельеф, характеризующийся как транскристаллитным, так и интеркристаллитным распространением трещин. Образцы второй группы имеют квазихрупкий излом со слабо развитым рельефом. Разрушение сварного соединения происходит по плоскости контакта при интеркристаллитном распространении трещины.

Таким образом, наличие в зоне контакта рекристаллизованного слоя, обладающего большой деформационной способностью по сравнению с основным металлом будет способствовать повышению качества сварного соединения за счет создания благоприятных условий для развития собирательной рекристаллизации и формирования общих зерен вдоль линии стыка

Ключевые слова: титановые сплавы, микроструктура, диффузионная сварка, механическая обработка, рекристаллизация

Одной из специфических особенностей сварных соединений сплава с исходной крупнозернистой пластинчатой структурой, полученных при температурах ниже температуры полиморфного превращения, является наличие полосы мелкозернистого металла, в зоне контакта (рис. 1, а – г). Ее появление связано с механической обработкой контактных поверхностей перед сваркой и рекристаллизацией, развивающейся в деформированной матрице в условиях сварки. Причем такой слой с мелкозернистой равноосной структурой подчиняется тем же закономерностям изменения с температурой, что и материал с подобной исходной структурой, т.е. полиморфное превращение сопровождается образованием пластинчатой структуры, поэтому после отжига при температурах выше окончания полиморфного превращения слой материала с мелкозернистой структурой отсутствует (рис. 1, г).

Глубина слоя с мелкозернистой структурой зависит от степени деформации поверхности заготовок с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой в процессе их механической обработки.

Чистовое точение и фрезерование значительно деформируют матрицу по сравнению со шлифованием и в одинаковых температурно-временных условиях способствуют более полному развитию процесса рекристаллизации обработки. Так, при точении ширина слоя с мелкозернистой структурой составляет 15–25 мкм, при фрезеровании 12–20 мкм, а при шлифовании около 8–10 мкм.

Исследование влияния микроструктуры контактных поверхностей на образование сварного соединения проводили на сплаве ОТ4 с исходной крупнозернистой пластинчатой структурой. Свариваемые образцы делили на две партии в зависимости от последовательности операций термической и механической обработки перед сваркой: А – заключительная операция – механическая обработка; Б – заключительная операция – вакуумный отжиг при 975 °С.

У образцов группы А в процессе сварки на границе раздела образуется зона мелкозернистого материала. Вакуумный отжиг образцов группы Б выше температуры полиморфного превращения проводили для ликвидации такой зоны перед сваркой. Сварку подготовленных таким образом образцов производили при температурах 800–1000 °С и давлении 5 МПа, которое прикладывалось при достижении температуры сварки.

Экспериментальные исследования показали, что наличие в поверхностном слое мелкозернистой

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: otsp@vorstu.ru
Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: bulkov_ab@mail.ru
Ларсов Сергей Михайлович – ВГТУ, студент, e-mail: larsov_sm@mail.ru

структуры оказывает положительное влияние на качество соединения.

Прочностные характеристики сварных соединений образцов группы Б во всем интервале исследованных температур и времени сварки (до температуры полиморфного превращения) имеют более низкие показатели прочности по сравнению с образцами группы А (таблица).

Предел прочности (σ_b) и ударная вязкость (a_n) сварных образцов групп А и Б

$t_{св},$ °С	$\tau_{св},$ мин	$\sigma_b, \text{ МПа}$		$a_n, \text{ МДж/м}^2$	
		А	Б	А	Б
800	30	120	30	–	–
	60	270	200	–	–
	120	440	184	–	–
	180	400	164	–	–
850	30	360	200	–	–
	60	560	274	–	–
	120	676	370	0,04	–
	180	704	360	0,07	–
900	30	650	264	–	–
	60	740	500	0,09	–
	120	724*	510	0,18	–
	180	740*	670	0,31	–
950	30	754	680	0,20	–
	45	730*	730	0,25	0,04
	60	730*	724	0,52*	0,04
1000	5	720	710	0,15	0,18
	10	730	720	0,17	0,18

* – разрушение по основному металлу

После сварки при 950 °С и $\tau \geq 45$ мин соединения образцов обеих групп имеют практически одинаковую прочность при испытаниях на статическое растяжение (таблица). Однако величина ударной вязкости и характер разрушения образцов групп А и Б выявляют различие полученных соединений (рисунк). После сварки при 1000 °С прочностные характеристики соединений становятся сопоставимыми для образцов обеих групп, что вероятно связано с одинаковым структурным состоянием свариваемых заготовок и их контактных поверхностей. Продолжительность сварки при этой температуре ограничивается величиной остаточной деформации образцов, которая за 10 мин составляла более 9 % (деформация свариваемых образцов групп А и Б при 950 °С и 60 мин составляла 5–6 %).

Анализ поверхностей разрушения сварных соединений показал, что они для образцов группы А и Б существенно различаются. Это особенно ярко проявляется при небольших увеличениях (до 100 крат). Образцы группы А в изломе имеют развитый рельеф (рис. 2, а), характеризующийся значительной неоднородностью, обусловленной как транскристаллитным, так и интеркристаллитным распространением трещины (рис. 2, б–г).

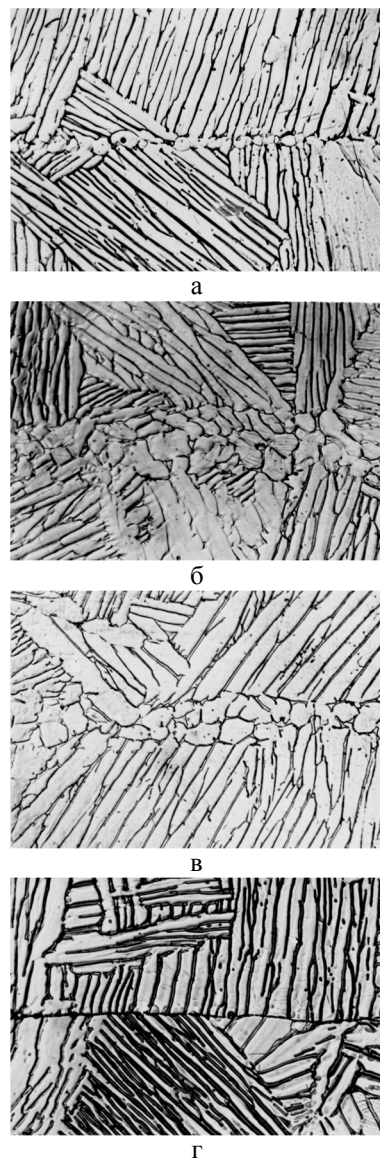


Рис. 1. Микроструктуры сварных соединений сплава ОТ4, полученных при температуре 950 °С и давлении 5 МПа в течение 60 мин. Финишная обработка контактных поверхностей ($\times 500$): а – шлифование; б – точение; в – фрезерование; г – точение с последующим отжигом при 975 °С

Образцы группы Б имеют квазихрупкий излом со слабо развитым рельефом (рис. 3, а). Разрушение сварного соединения происходит по плоскости контакта при интеркристаллитном распространении трещины, сопровождающемся образованием на большей части поверхности разрушения типичного сотового (мелкоячеистого) рельефа (рис. 3, б). На некоторых участках присутствуют отдельные слабо развитые гребни отрыва (рис. 3, в) или ручейчатый излом (рис. 3, г).

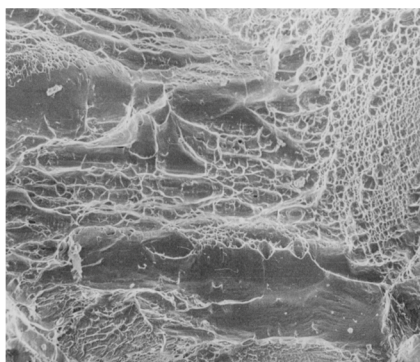
На рис. 4 приведена топография участков свариваемых поверхностей на которых физический контакт не успел образоваться полностью ($t_{св}=950$ °С, $P=5$ МПа, $\tau=30$ мин). Эти участки характеризуются наличием субмикрорельефов, формирование которых связано с развитием высокотемпературной деформации при сварке.



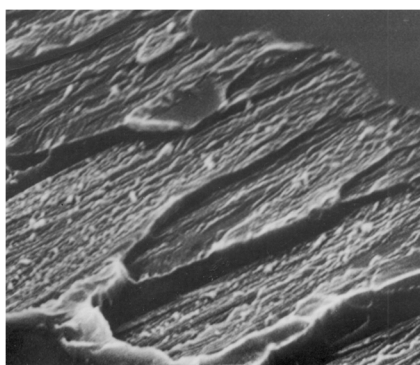
а ×100



б ×400

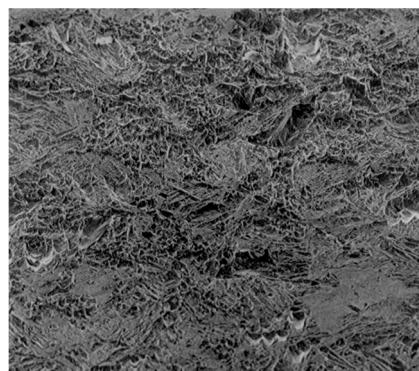


в ×1000

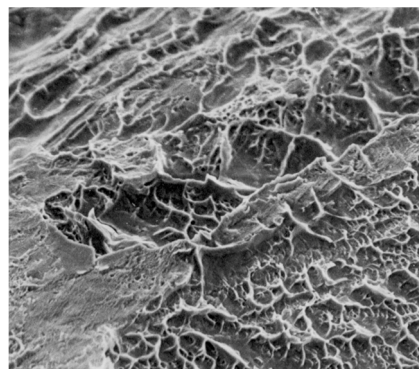


г ×6600

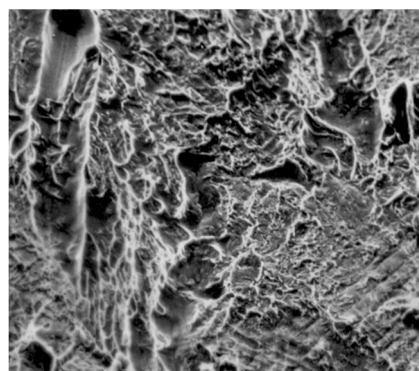
Рис. 2. Топография поверхностей разрушения сварного соединения сплава ОТ4 с крупнозернистой пластинчатой структурой полученного при 950 °С, Р=5 МПа, τ =60 мин и финишной обработке контактных поверхностей – точение



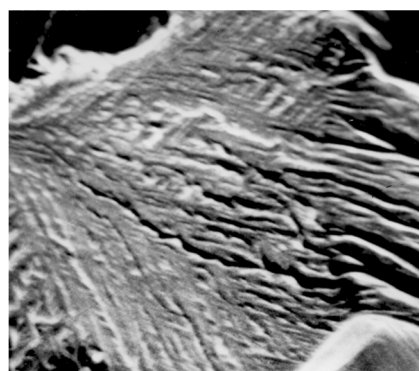
а ×3200



б ×15 000



в ×3200



г ×1500

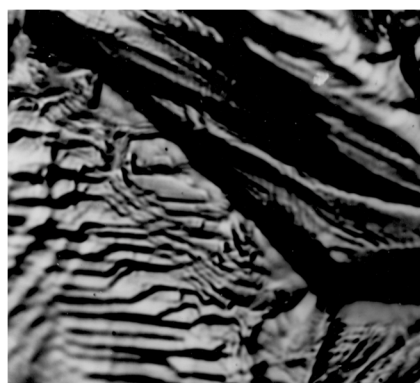
Рис. 3. Топография поверхностей разрушения сварного соединения сплава ОТ4 с крупнозернистой пластинчатой структурой полученного при 950 °С, Р=5 МПа, τ =60 мин и финишной обработке контактных поверхностей – отжиг при 975 °С



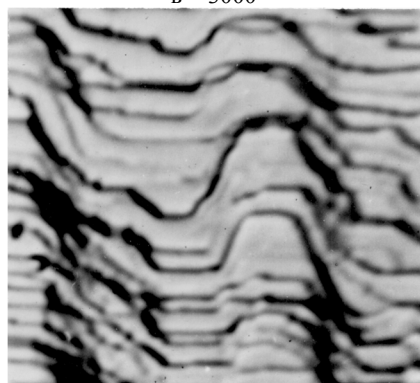
а ×3000



б ×6 000



в ×3000



г ×6000

Рис. 4. Топография поверхностей разрушения сварного соединения сплава ОТ4, полученного при 950 °С, $P=5$ МПа, $\tau=30$ мин: а, б – группа А; в, г – группа Б

В условиях ползучести отдельные объемы зерен, разориентированные друг относительно друга, могут смещаться и создавать дополнительный мик-

роструктурный и субструктурный рельеф [1]. Внутренние напряжения, обусловленные, например, анизотропными свойствами кристаллов, или развитием полиморфного превращения, также могут приводить к формированию на поверхности титана субструктурного рельефа [2].

В соответствии с размерами зерен, характеризующих микроструктуру на контактных поверхностях (5–10 мкм для образцов группы А и 300–400 мкм для образцов группы Б), линейные размеры «сдвигаемых» субмикрообъемов могут отличаться в десятки раз. Ширина участков субструктурного рельефа для образцов группы А составляет 0,15–0,3 мкм, для образцов группы Б – 0,6–1,2 мкм.

Для объяснения влияния микроструктуры контактных поверхностей образцов групп А и Б на механические характеристики сварных соединений можно предложить упрощенную схему формирования границы между свариваемыми заготовками.

В условиях диффузионной сварки в контакт вступают поверхности с развивающимся (или уже развитым) структурным или субструктурным микрорельефом. Начальный контакт таких поверхностей будет формироваться на отдельных микроучастках, являющихся очагами схватывания. Плотность таких участков и ширина зоны их расположения в контакте будут определяться микроструктурой поверхностей и, соответственно, размерами формирующегося микрорельефа.

На рис. 5 приведена схема формирования очагов схватывания между свариваемыми поверхностями в зависимости от их микроструктуры.

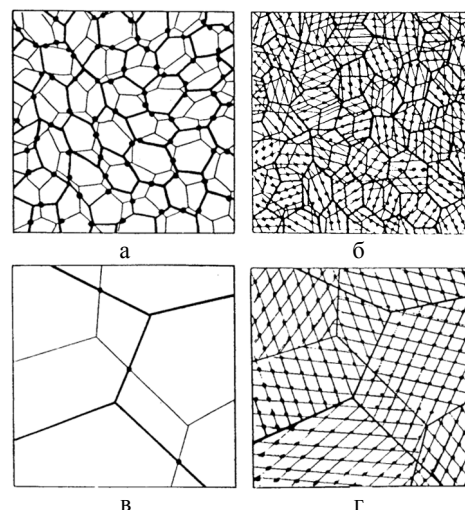


Рис. 5. Схемы образования очагов схватывания, образующихся в зоне контакта в результате развития микроструктурных (а, б) и субструктурных (в, г) рельефов при сварке образцов: а, б – группа А; в, г – группа Б

Наличие на контактных поверхностях слоя с мелкозернистой микроструктурой будет обеспечивать формирование в зоне контакта свариваемых заготовок значительно более узкой разупорядоченной границы с высокой плотностью очагов схватывания.

Сужение зоны разупорядочения и превращение ее в границу, аналогичную существующим в основ-

ном металле, будет происходить в результате развития деформации и диффузионных процессов в зоне контакта. Очевидно, чем шире начальная граница между свариваемыми заготовками и меньше плотность очагов схватывания, тем большая деформация и длительность процесса требуются для ее упорядочения.

Наличие в зоне контакта рекристаллизованного слоя, обладающего большой деформационной способностью по сравнению с основным металлом (о чем свидетельствует пониженная на 20 % микротвердость в зоне мелкого зерна: 3190 МПа по сравнению с 3990 МПа), будет способствовать уменьшению дефектности границы, а также созданию условий для развития собирательной рекристаллизации и формированию общих зерен вдоль линии стыка.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что при диффузионной сварке титановых сплавов с крупнозернистой пластинчатой структурой повышение качества соединения можно достичь за счет предварительной механической обработки контактных поверхностей.

2. Анализ топографии поверхностей излома диффузио-сварных соединений показывает, что причиной повышения качества является формирование слоя с равноосной мелкозернистой структурой, обеспечивающего формирование в зоне контакта свариваемых заготовок узкой разупорядоченной границы с высокой плотностью очагов схватывания.

Литература

1. Розенберг В.М. Ползучесть металлов / В.М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1967. – 276 с.
2. Пешков В.В. Диффузионная сварка титановых тонкостенных слоистых конструкций / В.В. Пешков, А.Б. Булков. – М.: Изд-во «РИТМ», 2016. – 242 с.

Воронежский государственный технический университет

THE EFFECT OF CONTACT SURFACES MICROSTRUCTURE ON THE JOINT FORMATION AT DIFFUSIVE WELDING OF TITANIUM

V.V. Peshkov¹, A.B. Bulkov², S.M. Larsov³

¹Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: otsp@vorstu.ru

²PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: bulkov_ab@mail.ru

³Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: larsov_sm@mail.ru

The article describes the impact of the presence and thickness of a layer with fine-grained structure on the mechanical properties of diffusive welded joints. The appearance of the layer is provided by recrystallization during welding of metal, subjected to deformation during preliminary machining. The depth of the layer with deformation degree sufficient for recrystallization depends on the type of pretreatment and is from 8–10 microns at grinding to 25 microns at turning.

The tests are carried out on the samples from alloy OT4 with original coarse-grained structure. Contact surfaces of the samples are machined. Then the samples are divided into two groups, depending on the type of treatment before welding. The first one is directly subjected to welding after machining, which led to the formation of fine-grained material zone at the interface of the blanks during welding. The second group is subjected to vacuum annealing at 975 °C (higher than the polymorphic transformation temperature) before welding to eliminate the effect of work hardening. Both groups are welded at temperatures of 800–1000 °C and a pressure of 5 MPa, applied when the welding temperature has been established.

The experimental studies have shown that strength properties of the welded joints of the first group in the range of the temperatures studied and the welding time (up to polymorphous transformation temperature) have higher strength as compared with the samples from the second group.

The topography of the fracture surfaces of the welded joints shows that the first group of samples has developed relief, characterized both with transcrystalline and intercrystalline crack propagation at the fracture. The samples of the second group have a quasi-brittle fracture with a weakly developed relief. The destruction of the welded joint takes place on the plane of contact at intercrystalline crack propagation.

Thus, the presence of recrystallized layer that has greater deformation ability than the base metal in the contact zone will enhance the quality of the welded joint through creation of favourable conditions for the development of collective recrystallization and grain formation along the general line of the joint

Key words: titanium alloys, microstructure, diffusive welding, machining, recrystallization

References

1. Rozenberg V.M., “Creep of metals” (“Polzuchest’ metallov”), Metallurgy (1967): 276
2. Peshkov V.V., Bulkov A.B., “Diffusion welding of titanium thin-layered structures” (“Diffuzionnaya svarka titanovykh tonkostennykh sloistykh konstrukcij”), Rhythm (“RITM”) (2016): 242

РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СКОРОСТНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ

Ю.А. Цеханов

Современная чистовая обработка резанием для получения высокого качества поверхности и производительности осуществляется со все большими скоростями - до сотен метров в секунду. При этом проявляются инерционные свойства срезаемой массы, которые увеличивают силы резания за счет динамических явлений. Это необходимо учитывать как при технологических расчетах режимов обработки, так и при проектировании режущего инструмента. Предложена инженерная теоретическая модель ортогонального резания с одной плоскостью разрыва скоростей течения срезаемого материала, позволяющая получить верхнюю оценку мощности и сил резания на основе вариационных принципов теории пластичности. Введено понятие динамического коэффициента силы резания, показывающего во сколько раз сила скоростного динамического резания больше силы медленного статического резания. Получена формула для его вычисления в зависимости от геометрических параметров разрывного поля скоростей. Численный анализ показал, что значимо динамические инерционные свойства срезаемой стружки (увеличение силы резания на 4%) проявляются при скоростях резания более 100 м/с. На основе вариационного принципа минимума мощности установлено, что с увеличением скорости резания толщина стружки увеличивается. Получены формулы для расчета мощности резания и ее составляющих в зависимости от скорости резания. Разработанная модель может быть использована в технологической практике и при изучении механики скоростного лезвийного и абразивного резания.

Ключевые слова: резание, годограф скоростей, плоскость и угол сдвига, динамический коэффициент резания, мощность и силы резания

Внедрение в практику все более высокоскоростных методов резания и шлифования ставят задачу изучения механики этих процессов с учетом динамических усилий и явлений, возникающих из-за проявления инерционных свойств срезаемого слоя. В данной работе в качестве примера рассмотрена простейшая схема ортогонального резания [1], кинематическое возможное поле скоростей которого определяется одной плоскостью разрыва скоростей (рис.1). Она позволяет получить верхние оценки энергосиловых параметров [2] и выявить их основные закономерности, что достаточно для проектирования технологических операций и инструмента, но не дает точного представления о напряженно-деформированном состоянии в зоне резания. Размер в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, принят равным единице.

В единицу времени через плоскость разрыва OA со скоростью резания V проходит материал массой ρVh с плотностью ρ .

Изменение его количества движения равно $\rho Vh\Delta\vec{V}_s$, и равно импульсу динамической силы $\vec{F}_\delta \cdot 1$, приложенной к стружке со стороны реза, в единицу времени: Отсюда $\vec{F}_\delta = \rho Vh\Delta\vec{V}_s$. (1)
Разрыв скорости ΔV_s , касательной к плоскости сдвига, и скорость стружки V_c известны из годографа скоростей (рис.1,б):

$$\Delta V_s = V \frac{\cos \gamma}{\cos(\beta - \gamma)}; \quad V_c = V \frac{\sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}. \quad (2)$$

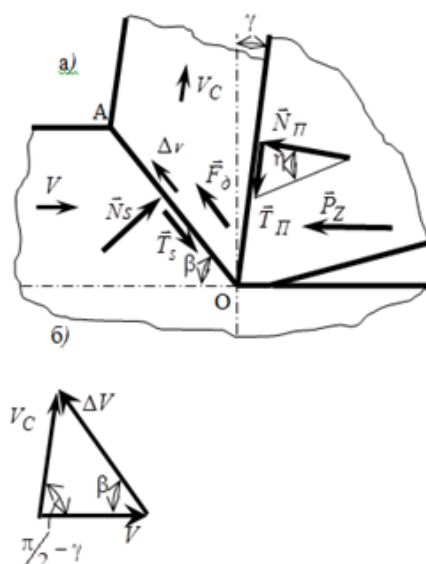


Рис. 1. Схема резания: а) силы и скорости; б) годограф скоростей

Рассмотрим все силы, действующие на стружку, как со стороны плоскости разрыва (T_s и N_s), так и со стороны передней поверхности.

Динамическая сила $\vec{F}_\delta$ является равнодействующей этих четырех сил: $\vec{F}_\delta = \vec{T}_\Pi + \vec{N}_\Pi + \vec{T}_s + \vec{N}_s$. По принципу д'Аламбера стружку можно рассмотреть в состоянии условного равновесия под действием этих четырех сил и силы инерции $\vec{F}_i = -\vec{F}_\delta$.

Соответствующий замкнутый силовой многоугольник показан на рис.2.

Через $\vec{R} = \vec{N}_\Pi + \vec{T}_\Pi = -\vec{N}_s - \vec{T}_s$ обозначена равнодействующая сила динамического резания.

Цеханов Юрий Александрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: tsekhanov@yandex.ru

$$\text{Сила} \quad T_s = \tau_s OA = \tau_s \frac{h}{\sin \beta} \quad (3)$$

есть сила статического пластического сдвига в плоскости OA , где τ_s - напряжение сопротивления сдвигу на плоскости OA .

Как видно из рис. 2, для построения модели удобно

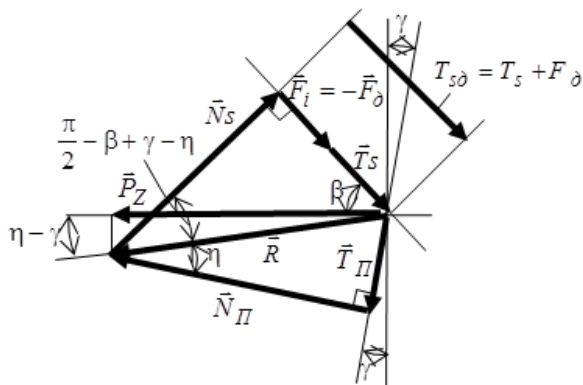


Рис. 2. Графическое суммирование составляющих силы резания

ввести суммарную динамическую силу T_{sd} , условно приложенную в плоскости сдвига:

$$T_{sd} = T_s + F_{\delta}. \quad (4)$$

Преобразуем (3) с учетом (1) и (2) к виду:

$$T_{sd} = T_s K_{\delta}, \quad (5)$$

где

$$K_{\delta} = 1 + 2D \frac{\cos \gamma \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)} \quad (6)$$

можно назвать **динамическим коэффициентом резания**. Он показывает во сколько раз за счет динамических явлений возрастает сила сдвига. Как будет показано ниже, во столько же раз возрастают все составляющие силы резания, а значит и мощность процесса.

$$\text{Параметр} \quad D = \frac{\rho V^2 / 2}{\tau_s} \quad (7)$$

можно назвать **параметром динамического давления**, поскольку $p = \frac{\rho V^2}{2}$ является выражением для динамического давления жидкости с плотностью материала заготовки, которая условно срезается резцом. Величину p можно назвать **динамическим давлением срезаемого слоя**. Параметр D показывает во сколько раз это динамическое давление больше напряжения сопротивления сдвигу.

Теоретически D меняется от 0, что соответствует медленному статическому резанию с $V = 0$

или резанию невесомого материала с $\rho = 0$, до ∞ , что может быть при $V \rightarrow \infty$ (мгновенное резание) или при $\tau_s = 0$ (движение резца в плотной невязкой жидкости). Например, при скоростном резании стали 45 ($\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\tau_s = 300 \text{ МПа}$) зависимость параметра D от скорости резания показана на рис.3, а динамического коэффициента $K_{\delta}(V)$ - на рис.4.

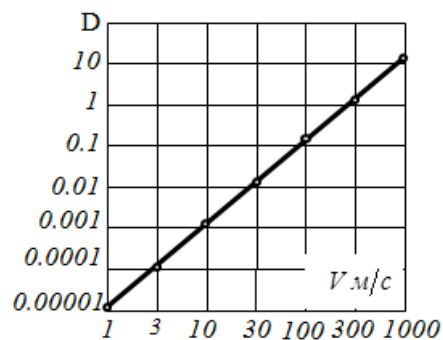


Рис. 3. Зависимость параметра динамического давления D от скорости резания V

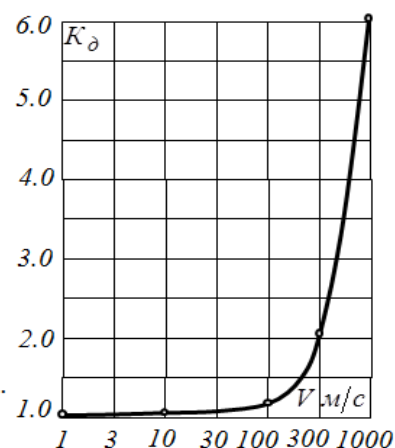


Рис. 4. Зависимость динамического коэффициента K_{δ} от скорости резания V при резании стали 45

Методика расчета $\beta = 31^\circ$ для динамических условий резания будет показана ниже (рис.6). Как видно, при резании стали 45 динамические эффекты начинают реально влиять на энергетику процесса при $V \geq 100 \text{ м/с}$.

Из плана сил (рис. 2) легко выразить все составляющие силы резания через T_{sd} , например:

$$T_{\Pi} = T_{sd} \frac{\sin \eta}{\cos(\beta + \eta - \gamma)}; \quad (8)$$

$$P_Z = T_{s\partial} \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\cos(\beta + \eta - \gamma)}, \quad (9)$$

или с учетом (3) и (5):

$$T_{II} = K_\partial \tau_s h \frac{\sin \eta}{\sin \beta \cos(\beta + \eta - \gamma)}; \quad (10)$$

$$P_Z = K_\partial \tau_s h \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\cos(\beta + \eta - \gamma)}. \quad (11)$$

В последних формулах $K_\partial \tau_s$ можно интерпретировать как динамическое напряжение сдвига

$$\tau_{s\partial} = K_\partial \tau_s. \quad (12)$$

Полная мощность резания W и ее составляющие: мощность трения о резец W_{mp} , полная мощность на плоскости сдвига W_s , которая складывается из мощности пластических деформаций W_{sp} и динамической мощности W_∂ , определяются из соотношений:

$$W = P_Z V; \quad W_{mp} = T_{II} V_c; \quad W_s = T_{s\partial} \Delta V; \quad (13)$$

$$W_{sp} = T_s \Delta V; \quad W_\partial = F_\partial \Delta V, \quad (14)$$

которые с учетом (1-3,5,6) записываются в виде:

$$W = \tau_s h V \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\cos(\beta + \eta - \gamma)} K_\partial(\beta); \quad (14)$$

$$W_{mp} = \tau_s h V \frac{\sin \eta}{\cos(\beta + \eta - \gamma) \cos(\beta - \gamma)} K_\partial(\beta); \quad (15)$$

$$W_s = \tau_s h V \frac{\cos \gamma}{\sin \beta \cos(\beta - \gamma)} K_\partial(\beta); \quad (16)$$

$$W_{sp} = \tau_s h V \frac{\cos \gamma}{\sin \beta \cos(\beta - \gamma)} K_\partial(\beta); \quad (17)$$

$$W_\partial = \tau_s h V \frac{\cos^2 \gamma}{\cos^2(\beta - \gamma)} 2D; \quad (18)$$

В этих выражениях $K_\partial(\beta)$ также является функцией неизвестного угла β согласно (6). На рис.5 показана зависимость безразмерной полной мощности $\bar{W} = \frac{W}{\tau_s h V}$ от β , рассчитанная по (14) для различных значений D .

Как видно, при любых скоростях резания имеется такое одно значение β^* , при котором полная мощность минимальна. В соответствии с вариаци-

онными принципами механики процесс резания и будет протекать при таком β^* . Для его определения используем условие:

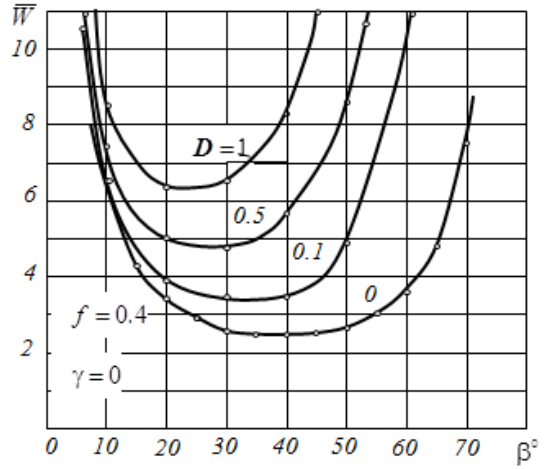


Рис. 5. Зависимость относительной мощности резания от угла β

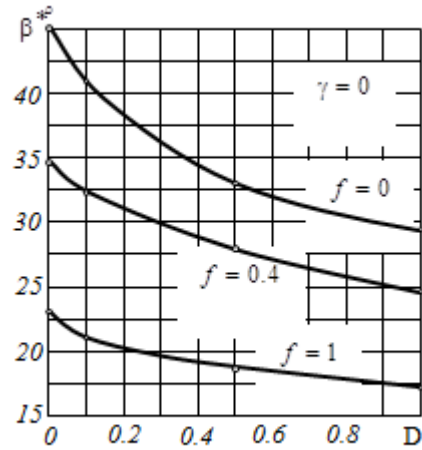


Рис. 6. Зависимость угла β^* от параметра динамического давления D и от коэффициента трения f

$$\frac{\partial \bar{W}}{\partial \beta} = 0, \quad (19)$$

которое после вычисления производной от функции (14) с учетом (6) после достаточно трудоемких тригонометрических преобразований сводится к трансцендентному относительно β^* уравнению:

$$\frac{\cos(2\beta^* + \eta - \gamma) \cos^2(\beta^* - \gamma)}{\sin(2\beta^* - 2\gamma + \eta) \sin^2 \beta^* \cos \gamma} = -2D. \quad (20)$$

Для $\gamma = 0$ его решение методом итераций представлено графиками на рис.6.

Как видно, с ростом скорости резания всегда наблюдается уменьшение угла β , а значит увеличение коэффициента усадки стружки и ее толщины.

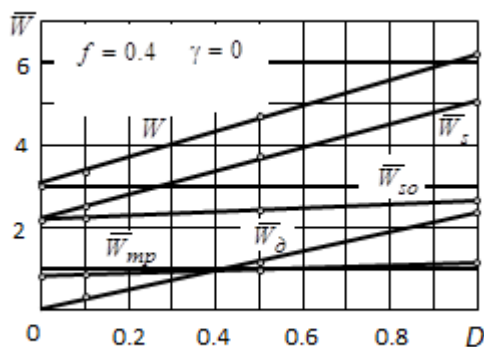


Рис. 7. Зависимость безразмерной мощности резания и ее составляющих от параметра динамического давления D

При медленном (статическом) резании ($D = 0$) значение β^* совпадает с известным решением

$$2\beta^* = \frac{\pi}{2} + \gamma - \eta. \text{ Действительно, при условии } D = 0$$

т.к. $\cos^2(\beta^* - \gamma) > 0$ (случай $\beta^* - \gamma = \frac{\pi}{2}$ известное

решение $\cos(2\beta^* + \eta - \gamma) = 0$ не имеет физического смысла), имеем указанное.

На рис.7 представлен пример зависимости безразмерной полной мощности резания и ее составляющих от параметра D .

Как видно, с ростом D все составляющие возрастают практически по линейной зависимости.

Представленная в данной работе модель динамического резания является простейшей, т.к. не учитывает многие явления резания, в частности де-

формационное упрочнение и термическое разупрочнение срезаемого материала при пластическом деформировании в плоскости разрыва скоростей. Однако она позволяет оценить величину пластических сдвиговых деформаций, а значит и степень деформационного упрочнения, увеличивающего сдвиговое напряжение τ_s . Кроме того, при скоростном резании этот процесс пластического деформирования можно считать адиабатическим, когда вся мощность пластических деформаций превращается в плоскости разрыва в тепловую энергию. А предложенная модель позволяет рассчитывать по (17) и мощность пластических деформаций W_{sp} , а значит при известных из эксперимента температурно-механических реологических свойствах оценивать уменьшение τ_s от температурного разупрочнения.

На основе развития данной модели возможно дальнейшее изучение важных закономерностей динамического резания и микрорезания как при скоростном точении, так и при абразивной обработке, в том числе с использованием методов теории подобия и размерностей [3].

Литература

1. Цеханов Ю.А. Модель скоростного ортогонального резания / Ю.А. Цеханов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 434
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
3. Цеханов Ю.А. Моделирование энергосиловых параметров резания методами теории подобия и размерностей / Ю.А. Цеханов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. – Т. 11. №2. – С. 27.

Воронежский государственный технический университет

CALCULATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF HIGH-SPEED ORTHOGONAL CUTTING

Y. A. Tsekhanov

Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: tskhanov@yandex1.ru

Modern finishing edge cutting machining for obtaining high quality surface and productivity is carried out with increasing speeds up to hundreds of meters per second. In this case the inertia properties of chip mass become meaningful because they increase the cutting forces due to the dynamic phenomena. This should be taken into account when calculating production modes and designing cutting tools. The article proposes a theoretical engineering model of orthogonal cutting with one plane of velocity discontinuity in feeding of the cut material. The model allows to estimate the maximum power and cutting force basing on variational principles of the theory of plasticity. The concept of dynamic cutting force coefficient is introduced. The coefficient indicates how many times the high-speed dynamic cutting force is more than slow static cutting force. A formula depending on the geometrical parameters of discontinuous velocity field is developed for its calculation. Numerical analysis has shown that significant dynamic inertial properties of the chips (the increase of the cutting force for more than 4 %) appear at cutting speeds of more than 100 m/s. It is revealed on the base of the variational principle of power minimum that the more the cutting speed is the thicker the chips are. Formulas for calculating the cutting power and its components depending on cutting speed are obtained. The developed model can be used in technological practice and when studying the mechanics of high-speed cutting and abrasive machining

Key words: cutting, hodograph of velocities, plane and angle of shear, dynamic coefficient of cutting, cutting power and cutting forces

References

1. Tsekhanov Y.A. "High speed orthogonal cutting model" ("Model' skorostnogo ortogonal'nogo rezaniya"), Cutting and tools in technological systems (Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemah: mezhdunar. nauch.-tekhn. sb.): International Scientific Digest, Har'kov: National Polytechnic University "Har'kov Polytechnic Institution" 75 (2008): 434.
2. Kachanov L.M. "The basis of the Theory of Plasticity" ("Osnovy teorii plastichnosti"), Science (Nauka) (1969): 420
3. Tsekhanov Y.A. "Modeling of the energy-power parameters of cutting using the methods of the theory of similarity and dimensions" ("Modelirovanie ehnergosilovykh parametrov rezaniya metodami teorii podobiya i razmernostej"), Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik VGTU) 11 (2015): 27.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНА И СХЕМЫ ИХ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В СОЕДИНЕНИЯХ

М.В. Семенов

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния слоистых конструкций из титана, элементы которых соединены с помощью диффузионной сварки. Использованы методики, построенные на основе метода конечных элементов, а также теории упругости. На основе анализа результатов вычислительных экспериментов установлены условия влияния соотношения размеров элементов конструкций из титановых сплавов на формирование дефектов при их сварке. За основной фактор, влияющий на неравномерность перехода титана в пластическое состояние по контактной поверхности соединения элементов конструкции, принята эпюра распределения контактного давления. Выявлено влияние технологического листа, через который передается давление на свариваемые заготовки, на характер распределения нормальных напряжений по контактным поверхностям. Показаны расчетные данные исследования влияния сил трения на эпюру распределения контактных сил между соединяемыми деталями. Представлены рекомендации для проектирования конструкций изделий из титана, а также определения параметров технологического процесса диффузионной сварки, обеспечивающие минимальную вероятность появления дефектов в процессе их сварки

Ключевые слова: лист, заполнитель, толщина, напряжения, контактные силы, распределение, податливость, рекомендации

Сварка заготовок из титановых сплавов происходит при пластическом состоянии слоев металла в зоне, близкой к контактным поверхностям. Согласно условию Мизеса [1] наступление пластического состояния зависит от величины нормальных и касательных напряжений (контактных сил) в зонах, прилегающих к поверхностям, по которым необходимо обеспечить соединение заготовок. Известно [2], что силы контактного взаимодействия деталей распределены неравномерно и эпюра нормальных сил зависит от геометрии сжимаемых заготовок. Равномерное распределение обеспечить практически невозможно, но, тем не менее, необходимо стремиться к обеспечению максимальной равномерности, т.к. это приведет к уменьшению вероятности появлению зон, в которых не произойдет диффузионного соединения заготовок и появятся дефекты.

Исследование направлено на получение информации о распределении контактных сил и напряженного состояния в зоне контакта заготовок с учетом контактной податливости сотового заполнителя и несущей обшивки, а также деформаций заготовок под действием технологических нагрузок.

Технологическое давление сварки принималось равным $p = 1$ МПа. Толщина δ_0 листов 2, 3 обшивки принята равной 1 мм, толщина δ_3 листа 1 заполнителя изменялась в пределах от 0,2 до 1 мм (рис.1).

Высота h заполнителя (расстояние между листами обшивки) рассматривалась в интервале от 2 до 10 мм. Конструкция нагружалась непосредственно технологическим давлением на листы обшивки, а также через технологический лист. Исследование выполнено методом конечных

элементов (МКЭ) с использованием модуля Pro/MECHANICA программного комплекса Pro/ENGINEER. При разбиении на конечные элементы проводилось сгущение сетки в контактных зонах.

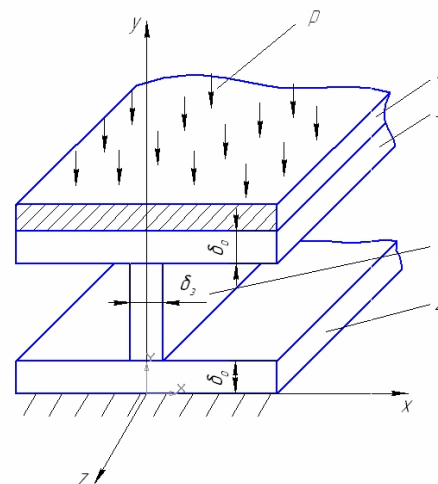


Рис. 1. Схема нагружения

Картинки напряженного состояния для различных вариантов конструкций приведены на рис. 2, 3. Рядом с изображением общего напряженного состояния конструкции приводятся фрагменты изображения напряженного состояния в зонах, прилегающих к контакту – свариваемым поверхностям. Видны значительные повышения напряжений в краевых зонах контактов, и картина распределения напряжений вглубь элементов. При толщине заполнителя $\delta_3 = 0,2$ мм (рис.2) поле напряжений в зоне опоры заполнителя на нижний лист не выходит на нижнюю опорную поверхность, а при толщине заполнителя $\delta_3 = 1$ мм (рис.3) зона повышенных напряжений охватывает сечение нижнего листа по всей толщине. В верхнем листе напряженное состояние соответствует деформации изгиба, при которой верхние слои растягиваются, а нижние сжимаются.

Напряжения сжатия (σ_x) нижних волокон верхнего листа имеют максимальное значение в средней части контактной зоны. Поперечные деформации ε_y в направлении оси y распределены вдоль контактной поверхности в направлении оси x также неравномерно, достигая максимальных значений в средней части. Таким образом, имеет место вспучивание листа обшивки в направлении вертикальной оси к заполнителю. Поперечные деформации ε_y оказывают существенное влияние на характер распределения исследуемых контактных давлений.

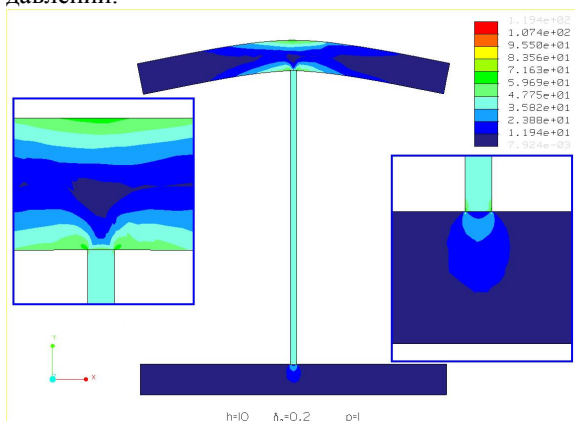


Рис. 2. Напряженное состояние конструкции при высоте заполнителя $h = 10$ мм, толщине $\delta_3 = 0,2$ мм

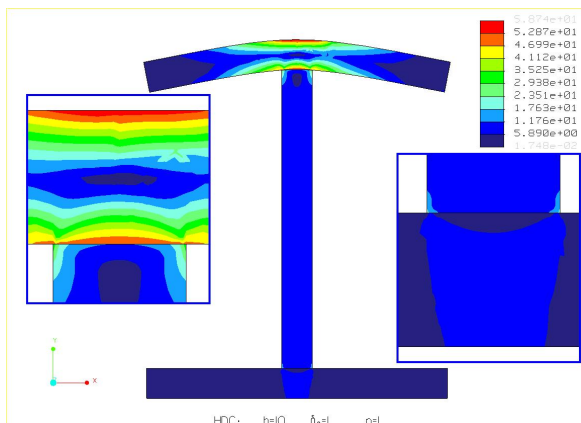


Рис. 3. Напряженное состояние конструкции при высоте заполнителя $h = 10$ мм, толщине $\delta_3 = 1$ мм

Распределение напряжений в конструкции с высотой заполнителя $h = 2$ мм и шириной $\delta_3 = 0,2$ мм аналогично рассмотренному варианту.

На рис.4 приведены эпюры распределения контактных сил по ширине заполнителя при его ширине $\delta_3 = 0,2 \dots 1$ мм и высоте $h = 10$ мм для верхнего (эпюра 1) и для нижнего (эпюра 2) листов. Видно существенное влияние условий нагружения на неравномерность распределения контактных сил. Выявлена также зависимость концентрации контактных сил от соотношения размеров свариваемых элементов.

Значения коэффициента k концентрации нормальных сил составят соответственно 1,2 и 4,2. Видно, что в этом случае предельным

соотношением толщины δ_3 заполнителя и его высоты h , превышение которого может привести к раскрытию стыка, является величина $\delta_3/h = 0,1$.

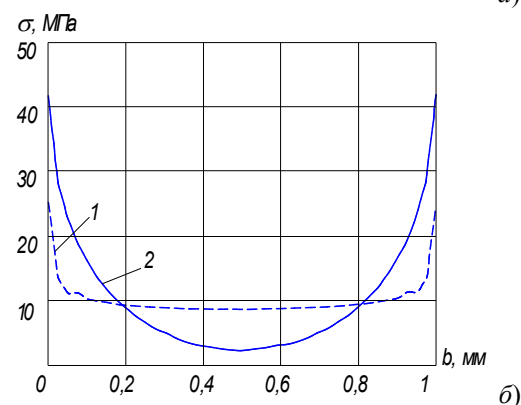
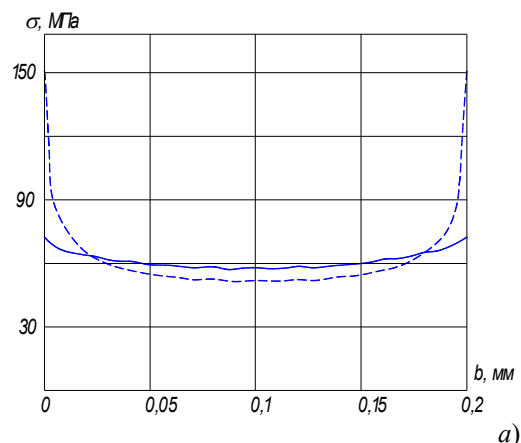


Рис. 4. Распределение контактных сил по ширине заполнителя толщиной $\delta_3 = 0,2$ мм (а) и $\delta_3 = 1$ мм (б)

Применение схемы комбинированного нагружения при соединении давлением с целью получения качественных конструкций при действии нормальных и касательных сил требует обоснования условий и параметров такого нагружения. Определение оптимального направления действия сдвигающих сил выполнено на основе рассмотрения решения задачи [3] (рис.1) давления полосового элемента 1 (заполнителя) шириной δ_3 конструкции на упругий лист 2 толщиной δ_0 . Верхний лист 3 свариваемой конструкции нагружен технологическим давлением p сварки через технологический лист 4.

Граничные условия рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned} v_2(x_0 z) &= 0; \\ \tau_{xy}(x_0 z) &= 0; \\ \tau_{yz}(x_0 z) &= 0; \\ \tau_{xy}(x \delta_0 z) &= 0; \\ \tau_{yz}(x \delta_0 z) &= 0; \end{aligned}$$

$\sigma_y(x \delta_0 z) = 0$ – на недеформированной поверхности листа;

v_1 и v_2 – перемещения точек заполнителя и листа в направлении оси Oy .

$v_1 + v_2 = \alpha$ – для точек контакта (здесь $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ – сближение элемента заполнителя α_1 и листа α_2 при сжатии);

Поперечная сила P_x действует в направлении оси x .

Предполагается, что нормальная P и сдвигающая P_x силы связаны соотношением $P_x = f \cdot P$ (f – коэффициент трения). Сжимающая сила P , отнесенная к длине заполнителя вдоль оси z , зависит от давления p .

Эпюра давления по контактной плоскости заполнителя для поставленной задачи определялась по зависимости [3] ($-0,5\delta_3 \leq x \leq 0,5\delta_3$)

$$q(x) = \frac{P \cdot \cos \pi \lambda}{2\pi \sqrt{\delta_3^2 - x^2}} \left[\left(\frac{\delta_3 - x}{\delta_3 + x} \right)^\lambda + \left(\frac{\delta_3 + x}{\delta_3 - x} \right)^\lambda \right]$$

где $\lambda = 1/\pi \arctg [f E/2 (1 - \mu^2) G]$; E – модуль упругости, G – модуль сдвига, μ – коэффициент Пуассона материалов соединяемых заготовок.

Расчеты выполнены по приведенной зависимости при значениях механических характеристик $E = 1,1 \cdot 10^5$ МПа, $G = 0,5 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,4$ и при $P = 1$ МН/м, $\delta_3 = 1$ мм.

Распределение давления $q(x)$ между заполнителем и нижним листом вычислено при различных величинах коэффициента трения $f = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$.

На рис.5 показан график изменения величины максимальных контактных сил в зависимости от коэффициента трения между свариваемыми элементами.

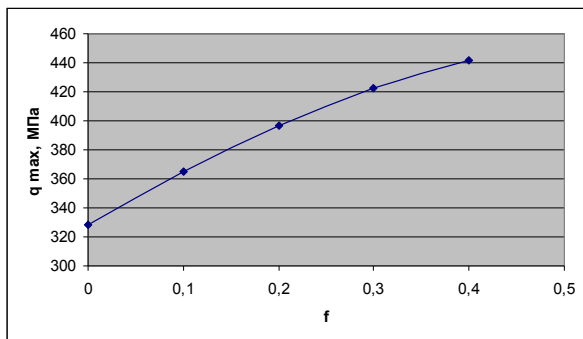


Рис. 5. Зависимость максимальных контактных сил от коэффициента трения

Видно, что с повышением коэффициента трения f неравномерность усиливается, и такое решение нельзя признать эффективным.

Снижение коэффициента трения путем применения смазки нельзя считать рациональным решением, т.к. при наличии между свариваемыми

элементами промежуточной среды ухудшаются условия для возникновения адгезионных связей.

Поэтому необходим поиск решения, исключая влияние сил трения на неравномерность распределения контактных сил. Как известно, силы трения всегда направлены против скорости скольжения. Таким образом, если к сжимаемым элементам приложить силу, действующую вдоль оси z , то силы трения (касательные контактные напряжения) развернутся в направлении оси z , и их влияние на возникновение зон затрудненной деформации в направлении оси x значительно снизится. Это утверждение основывается также на принципе независимости действия сил. При такой схеме нагружения распределение нормальных сил не зависит от сил трения.

Выводы

1. Неравномерность распределения контактных сил зависит от соотношения размеров свариваемых элементов и при определенных вариантах размеров воздействие технологического давления может привести к раскрытию стыков соединяемых заготовок и появлению дефектов соединения.

2. Использование технологического листа при воздействии давления на элементы свариваемой конструкции приводит к исключению влияния соотношения конструктивных параметров свариваемых элементов на характер распределения контактных сил.

3. На основе рассмотрения контактных задач с учетом действия сил трения, предложена и обоснована схема комбинированного нагружения, обеспечивающая наиболее равномерное распределение сил контактного давления и минимизацию вероятности возникновения зон затрудненной деформации и дефектов.

Литература

1. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением/ М.В. Сторожев, Е.А. Попов.– М.: «Машиностроение», 1971. – 424 с.
2. Штаерман, И.Я. Контактная задача теории упругости/И.Я. Штаерман. М.: Гостехиздат, 1949 – 270 с.
3. Семеновиков В.С. Обоснование технологических режимов соединения заготовок давлением / В.С. Семеновиков, М.В. Семеновиков, В.В. Пешков // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2012. -Т. 8. -№4.– С .134 – 136.

INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF TITANIUM PARTS AND LOADING DIAGRAM DURING WELDING ON THE FORMATION OF DEFECTS IN JOINTS

M.V. Semenzhenkov

PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: for_maxs@mail.ru

The article presents the results of a study of stress-strain state of layered titanium structures with diffusive welded joints. The study uses the techniques that are based on the finite elements method and the theory of elasticity. The influence of the ratio of dimensions of the structural elements made of titanium alloys on the defects formation when welding are established basing on the analysis of the results of computational experiments. The contact pressure distribution diagram is taken as the main factor that affects the nonuniformity of titanium transition to a plastic state over the contact surface of connection of the structural elements. The influence of technological sheet that transmits the pressure onto the welded workpieces on the distribution of the normal stress over the contact surfaces is revealed. The article also shows the calculated data of the influence of friction forces on the diagram of the contact forces distribution between the joined parts. Recommendations for designing titanium structures are given, as well as for defining parameters for technological diffusive welding, that ensure minimum probability of defects appearance during welding

Key words: sheet, filler, thickness, stress, contact forces, welding, distribution, plasticity, recommendations

References

1. Storozhev M.V., Popov E.A., *"The theory of metals processing using pressure"* (*"Teorija obrabotki metallov davleniem"*), Mechanical Engineering (Mashinostroenie) (1971): 424
2. Shtaerman, I.Ja., *"The contact problem of the elasticity theory"* (*"Kontaknaja zadacha teorii uprugosti"*), State Technical Publishing (Gostehizdat) (1949): 270
3. Semenzhenkov V.S., Semenzhenkov M.V., Peshkov V.V., *"Justification of technological modes for connection of workpieces by pressure"* (*"Obosnovanie tehnologicheskikh rezhimov soedinenija zagotovok davleniem"*), Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta) 8, 4 (2012): 134 – 136

ПОЛЗУЧЕСТЬ СЛОИСТЫХ МИКРОСТРУКТУРНЫХ КОМПОЗИТОВ

В.В. Пешков, А.Б. Булков

Эффективным средством, обеспечивающим снижение деформации заготовок при диффузионной сварке, является применение смешанных структур, в которых чередуются участки с α -зернами глобулярной и пластинчатой формы. В данной статье приведены результаты изучения высокотемпературной ползучести композитного материала, полученного диффузионной сваркой листов с указанными структурами.

Исследования проводим на образцах диаметром 11,3 и высотой 20 мм из сплавов ОТ4 и ВТ20, которые нагружали сжимающим давлением от 1,0 до 20,0 МПа при температурах 850-950 °С (ОТ4) и 900-975 °С (ВТ20).

В ходе работы установлено, что скорость ползучести сплавов со слоистыми структурами зависит от объемного содержания материала с крупнозернистой структурой и направления приложения давления по отношению к слоям в композитных заготовках.

В случае приложения нагрузки параллельно слоям композита скорость ползучести композита уменьшается прямо пропорционально увеличению доли слоев с крупнозернистой структурой.

В случае приложения давления перпендикулярно слоям композита его деформация в основном обусловлена деформацией слоев с мелкозернистой структурой и зависит от их толщины и количества. Если толщина слоев с мелкозернистой структурой сопоставима или меньше диаметра образца, то проявляется эффект их контактного упрочнения, вследствие сдерживающего действия соседних слоев материала с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой, обладающих значительно более высоким сопротивлением деформации.

На основании проведенных исследований получены выражения для расчета скорости ползучести слоистых композитов

Ключевые слова: титановые сплавы, ползучесть, микроструктура, композит

Известно, что скорость ползучести титановых α и $\alpha+\beta$ -сплавов существенно зависит от их исходной микроструктуры [1]. Это дает возможность управлять процессом деформации конструкции при диффузионной сварке за счет оптимизации микроструктурного состояния свариваемых заготовок. Наиболее перспективно применение смешанных структур в которых чередуются участки с α -зернами глобулярной и пластинчатой формы.

Основным способом получения такого материала является диффузионная сварка пакета из листов различной толщины с указанными структурами.

Практическое применение структурных композитов требует изучения их механических свойств, в частности, высокотемпературной ползучести.

Для исследования высокотемпературной ползучести использовали образцы (рис. 1) диаметром 11,3 мм и высотой 20 мм, которые изготавливали из заготовок слоистых микроструктурных композитов из сплава ОТ4 и ВТ20. Сжимающее давление $p=1,0-20,0$ МПа прикладывали в интервале температур 850-950 °С (ОТ4) и 900-975 °С (ВТ20).

В ходе выполнения работы было установлено, что скорость ползучести сплавов со слоистыми структурами зависит от объемного содержания материала с крупнозернистой структурой (V_k) и направления приложения давления по отношению к слоям в композитных заготовках (рис. 1).

В случае приложения нагрузки параллельно слоям композита (рис. 1, а) скорость ползучести $\dot{\epsilon}_{cl}$ уменьшается с увеличением V_k . В исследованном

интервале температур и давлений выполняется неравенство $\dot{\epsilon}_{mc} > \dot{\epsilon}_{cl} > \dot{\epsilon}_{kc}$ (где индексы «сл», «мс», «кс» соответствуют слоистому композиту, материалу матрицы – сплаву с мелкозернистой структурой при $V_k=0$ и материалу армирующего компонента – сплаву с крупнозернистой структурой при $V_k=100\%$).

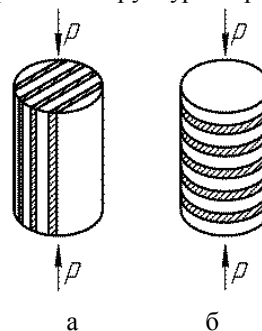


Рис. 1. Схемы взаимного расположения давления и слоев в микроструктурных композитах при их испытании на ползучесть:

а – параллельно, б – перпендикулярно

Экспериментальные значения $\dot{\epsilon}_{cl}$, полученные при постоянной температуре испытания, хорошо укладываются на прямые в логарифмических координатах $\ln \dot{\epsilon}_{cl} - \ln p$ (рис. 2), т.е. $\dot{\epsilon}_{cl} \approx p^n$ (где n – тангенс угла наклона прямых к оси $\ln p$).

Повышение V_k в интервале от 0 до 50 % сопровождается увеличением показателя степени n , величину которого можно определить по зависимости

$$n = 1 + 0,04 \cdot V_k.$$

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: otsp@vorstu.ru
Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: bulkov_ab@mail.ru

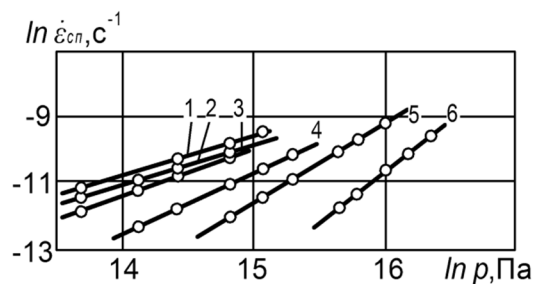


Рис. 2. Зависимость $\ln \dot{\varepsilon}_{сл} - \ln p$ сплава ОТ4 при 950 °С и V_k (%), равном:

0 – (1), 8 – (2), 20 – (3), 34 – (4), 50 – (5), 100 – (6)

Эффективная энергия активации процесса ползучести микроструктурных композитов определяли путем построения зависимостей $\ln \dot{\varepsilon}_{сл} - 1/T$. В исследованном интервале параметров эксперимента (t, p) эти зависимости представляют собой прямые линии (рис. 3). С увеличением содержания крупнозернистой структуры угол их наклона к оси $1/T$ возрастает. При $V_k=50$ % значение E достигает максимума (385 кДж/моль – ОТ4; 490 кДж/моль – ВТ20) и дальнейшее увеличение V_k не изменяет его.

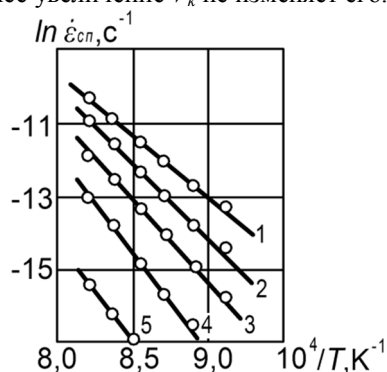


Рис. 3. Зависимость $\ln \dot{\varepsilon}_{сл} - 1/T$ сплава ОТ4 при $p=2$ МПа и V_k (%), равном:

0 – (1), 20 – (2), 34 – (3), 50 – (4), 100 – (5)

Эффективную энергию активации процесса ползучести для интервала изменения V_k от 0 до 50 % можно оценить по выражениям (кДж/моль): для ОТ4 – $E=272+2,26 \cdot V_k$, для ВТ20 – $E=327+3,4 \cdot V_k$.

Расчет значений $\dot{\varepsilon}_{сл}$ (с⁻¹) в интервале $0 \leq V_k \leq 50$ % можно проводить по зависимостям:

$$\text{для ОТ4} - \dot{\varepsilon}_{сл} = 10^{6,6+0,096V_k} \cdot p^{1+0,04V_k} \cdot \exp\left(-\frac{272+2,26V_k}{RT}\right),$$

$$\text{для ВТ20} - \dot{\varepsilon}_{сл} = 10^{8,9+0,114V_k} \cdot p^{1+0,04V_k} \cdot \exp\left(-\frac{327+3,4V_k}{RT}\right).$$

Одинаковая скорость ползучести композитов с разным микроструктурным состоянием (V_k от 0 до 100 %) достигается приложении различного по величине давления. Анализ зависимостей $\dot{\varepsilon}(T)$ и $p(V_k)$ показал, что закономерности ползучести слоистых структурных композитов из титановых сплавов соответствуют модели ползучести композитов с непрерывными волокнами. Выражение для расчета

давлений, вызывающих определенную скорость ползучести можно получить, используя правило смеси:

$$p_{сл} = p_{мс} \cdot (1 - V_k/100) + p_{кс} \cdot V_k/100.$$

В случае приложения давления перпендикулярно слоям композита (рис. 1, б) его деформация $\varepsilon_{сл}$ в основном обусловлена деформацией слоев с мелкозернистой структурой $\varepsilon_{нл}^{мс}$ и зависит от их толщины h и количества m . Так как в области рассматриваемых давлений слои с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой практически не деформируются, то можно считать, что $\varepsilon_{сл} = \sum_{i=1}^m \varepsilon_{нл}^{мс}$.

Пластическая деформация при сжатии каждого слоя с мелкозернистой микроструктурой происходит в стесненных условиях вследствие сдерживающего действия соседних слоев материала с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой, обладающей значительно более высоким сопротивлением деформации. Это приводит к контактному упрочнению слоя с мелкозернистой глобулярной структурой, скорость ползучести которого будет зависеть от его относительной толщины $\lambda = h/D$ (где h – толщина и D – диаметр слоя). Увеличение значений λ до 1,0 при прочих одинаковых условиях приводит к росту скорости ползучести прослойки с мелкозернистой структурой $\dot{\varepsilon}_{нл}^{мс}$ (табл.). При $\lambda \geq 1,0$ $\dot{\varepsilon}_{нл}^{мс} = \dot{\varepsilon}_{мс}$ и дальнейшего повышения значения $\dot{\varepsilon}_{нл}^{мс}$ не наблюдается.

Скорость ползучести $\dot{\varepsilon}_{сл}$ и $\dot{\varepsilon}_n^{мс}$ структурных слоистых композитов при $p=2,0$ МПа

Сплав ВТ20 при 975 °С		Сплав ОТ4 при 950 °С			
Нагрузка приложена параллельно слоям композита		Нагрузка приложена перпендикулярно слоям композита			
V_k , %	$\dot{\varepsilon}_{сл}$, с ⁻¹	$\lambda = h/D$	$\dot{\varepsilon}_n^{MC}$	K_λ^3	$K_\lambda = 1 + \frac{1}{3\sqrt{3}h}$
0	$5,0 \cdot 10^{-5}$	6,0	$4,6 \cdot 10^{-5}$	1,0	1,03
20	$1,0 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-
34	$3,7 \cdot 10^{-6}$	3,0	$4,55 \cdot 10^{-5}$	1,0	1,06
50	$2,5 \cdot 10^{-7}$	1,5	$4,55 \cdot 10^{-5}$	1,03	1,13
70	$1,3 \cdot 10^{-7}$	-	-	-	-
100	$5,4 \cdot 10^{-8}$	1,0	$4,17 \cdot 10^{-5}$	1,1	1,2
		0,5	$3,0 \cdot 10^{-5}$	1,15	1,4
		0,2	$3,18 \cdot 10^{-5}$	1,45	2,0
		0,1	$2,2 \cdot 10^{-5}$	2,1	3,0
		0,05	$1,28 \cdot 10^{-5}$	3,6	4,9

Эффект контактного упрочнения материала с мелкозернистой глобулярной структурой может быть охарактеризован коэффициентом $K_\lambda^3 = \dot{\varepsilon}_{нл}^{мс} / \dot{\varepsilon}_n^{мс}$. При $\lambda \geq 1,0$ в пределах ошибки измерения $K_\lambda^3 = 1,0$. Экспериментальные значения K_λ^3 меньше расчетных K_λ , что можно объяснить погрешностями расчетной схемы (представлением слоев с крупнозернистой структурой как абсолютно жестких, неучетом краевых эффектов и т.д.).

В исследованном интервале параметров обработки при $\lambda < 1,0$ скорость ползучести пропорциональна приложенному давлению: $\dot{\varepsilon}_{nl}^{mc} \sim p^n$ (рис. 4). Исходя из этого, можно сделать вывод, что механизм ползучести прослойки с мелкозернистой структурой ($\lambda \leq 1,0$) и образцов с мелкозернистой структурой ($\lambda > 1,0$) - идентичны.

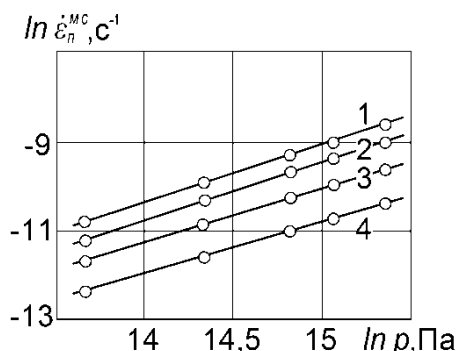


Рис. 4. Зависимость $\ln \dot{\varepsilon}_n^{mc} - \ln p$ сплава ОТ4 при 950 °С и λ , равном: 1,0 – (1), 0,2 – (2), 0,1 – (3), 0,05 – (4)

Скорость ползучести мелкозернистой прослойки можно оценить по зависимости

$$\dot{\varepsilon}_n^{mc} = \dot{\varepsilon}_{mc} / K_\lambda^3.$$

Для структурного композита, состоящего из m слоев с мелкозернистой структурой, с учетом различия в значениях K_λ^3 и K_λ будет

$$\dot{\varepsilon}_{cl} = 1,4 \cdot \dot{\varepsilon}_{mc} \cdot \frac{h \cdot m}{H \left(1 + \frac{1}{3\sqrt{3}h} \right)}.$$

Выводы

1. Скорость ползучести микроструктурного композита, полученного диффузионной сваркой листовых заготовок, зависит от объемного содержания материала с крупнозернистой структурой и направления приложения давления по отношению к слоям в заготовке.

2. При постоянных параметрах процесса сварки, можно изменять скорость высокотемпературной деформации материала заготовок из слоистых композитов в диапазоне значений от 10^{-4} до 10^{-8} с $^{-1}$ регулируя их структуру.

Литература

1. Диффузионная сварка титановых слоистых конструкций аэрокосмической техники / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Л. Батаронов и др.; под ред. В.С. Рачука. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», – 2012. – 312 с.

Воронежский государственный технический университет

CREEP OF MICROSTRUCTURAL LAYERED COMPOSITES

V.V. Peshkov¹, A.B. Bulkov²

¹Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: otsp@vorstu.ru

²PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: bulkov_ab@mail.ru

An effective way to ensure reduction of billets deformation during diffuse welding is using mixed structures where sections with α -grains of globular and lamellar forms alternate. The article presents the results of the study of high-temperature creep of composite material obtained by diffuse welding of sheets with the structures mentioned.

The study is conducted using samples of 11.3 mm in diameter and 20 mm height from alloys OT4 and VT20, which are loaded with compression pressure of 1.0 to 20.0 MPa at temperatures of 850-950 °C (OT4) and 900-975 °C (VT20).

The work established that the creep rate of alloys with layered structures depends on the volume content of the coarse-grained material and the pressure application direction relative to the layers in composite workpieces.

In the case of load application parallel to the layers of the composite its creep rate decreases in direct proportion to the increase in the share of layers with coarse-grained structure.

When pressure is applied perpendicular to the layers of the composite its deformation is mainly caused by deformation of the layers with fine-grained structure and depends on their thickness and number. If the thickness of the layers with fine-grained structure is comparable to or less than the diameter of the sample, there appears an effect of their contact hardening due to the restraining effect of the adjacent layers of the material with coarse-grained lamellar microstructure that have significantly higher resistance to deformation.

Formulas for calculation of lamellar composites creep rate have been obtained on the basis of the study

Key words: titanium alloys, creep, microstructure, composite

References

1. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Bataronov I.L., ed. Rachuk V.S., "Diffusion welding of titanium laminated structures of aerospace equipment" ("Диффузионная сварка титановых слоистых конструкций аэрокосмической техники"), Voronezh: Voronezh State Technical University (2012): 312

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А.А. Болдырев, А.И. Болдырев, А.В. Мандрыкин, А.В. Перова

В статье рассмотрены вопросы оптимизации технологических процессов электрохимической обработки, сформулированы основные критерии оптимизации и рассмотрены особенности моделирования по каждому из них. Для оптимизации как направления совершенствования проектирования операций основными задачами являются формирование набора технологических факторов, подлежащих оптимизации, и определение оптимальных значений каждого технологического фактора.

Структурная оптимизация обеспечивает выбор наилучшего варианта технологического процесса (технологической схемы электрохимической обработки) в том случае, когда для каждого варианта определены оптимальные значения технологических параметров, т.е. проведена параметрическая оптимизация.

Параметрическая оптимизация состоит в отыскании допустимых режимов такой точки, для которой выбранный критерий оптимальности имеет экстремальное значение. Для решения оптимизационной задачи применяют методы линейного или нелинейного программирования. В результате находят оптимальные значения параметров (геометрия электрода-инструмента, график загрузки оборудования и др.).

С помощью принципа сопоставимости производится комплексная оптимизация, которая предусматривает проведение структурной и параметрической оптимизации одновременно. Задача комплексной оптимизации технологического процесса многофакторная. Решение ее требует развития научных основ процесса электрохимической обработки и методов оптимизации, позволяющих получить наибольшую производительность, требуемое качество обработанных поверхностей, экономичность

Ключевые слова: оптимизация, критерии, электрохимическая обработка

Понятие оптимальности применительно к задаче проектирования технологического процесса электрохимической обработки (ЭХО) применимо, если он обеспечивает условия протекания анодного растворения металлов и сплавов и требования, предъявляемые к нему, а также обеспечивает экстремум критерия сложности.

Оптимальный технологический процесс – это не идеальный процесс, а процесс наилучший в смысле заданного критерия оптимальности, например, процесс обеспечивающий максимум производительности или минимум себестоимости. Процесс оптимальный по одному из критериев может быть не оптимальным по другому. Поэтому при проектировании оптимального технологического процесса особенно важным является выбор критерия оптимальности. Критерий оптимальности выбирается с учетом специфики предприятия и диктуется конкретной производственной ситуацией [1].

1. Оптимизация как направление совершенствования проектирования операций электрохимической обработки

Известно несколько критериев оптимальности, используемых в ЭХО: максимум производительности; минимум энергоемкости процесса, операции; минимум затрат на технологическое оснащение и др. [2]. Однако наиболее целесообразно применять интегральные критерии оптимальности, учитывающие весь комплекс затрат на организацию процесса обработки. Одним из таких критериев является технологическая себестоимость.

При выборе технологической схемы ЭХО наиболее полным показателем являются приведенные затраты

$$П_{\Sigma} = E_{\Sigma}K + C_{\Sigma}\Gamma, \quad (1)$$

где E_{Σ} – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений;

K – первоначальные затраты;

C_{Σ} – полная себестоимость детали (единицы продукции);

Γ – годовой выпуск изделий (программа).

Непременным условием решения оптимизационной задачи является система ограничений, которая описывает следующие группы:

- по производительности;

Болдырев Александр Александрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Болдырев Александр Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: aiboldyrev@mail.ru

Мандрыкин Андрей Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 221-06-95

Перова Алла Владимировна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: pva7@mail.ru

Зависимость (4) определяет возможность применения данного станка для реализации принятой технологической схемы ЭХО. Неравенства (5) устанавливают соответствие размеров рабочей зоны станка и перемещений его рабочих органов габаритным размерам детали и размерам обрабатываемых поверхностей. Неравенства (6) характеризуют соответствие точностных возможностей станка требуемой точности обработки. Неравенства (7) отражают экономическую целесообразность применения выбранного типа станка.

Оптимизационная задача состоит в отыскании варианта технологической схемы ЭХО и модели станка, удовлетворяющего системе ограничений и обеспечивающего экстремум функции цели.

Характерной особенностью структурной оптимизации является конечность множества возможных вариантов. Эта особенность обусловила применение поиска оптимального варианта путем перебора всех элементов множества вариантов с оценкой каждого по принятому критерию оптимальности. Этот метод реализуется за счет простых алгоритмов и применим при проектировании типовых технологических процессов.

Конечной целью структурной оптимизации является выбор оптимального варианта (технологической схемы ЭХО) обработки. Каждый вариант отличается от других оборудованием, оснасткой, электродами-инструментами, заготовками, компоновкой операции и характеризуется значением оценочного критерия. Но структурная оптимизация обеспечивает выбор наилучшего варианта технологического процесса в том случае, когда для каждого варианта определены оптимальные значения технологических параметров, т.е. проведена параметрическая оптимизация.

3. Параметрическая оптимизация

Параметрическая оптимизация является первым этапом оптимизационного решения технологических задач и заключается в расчете оптимальных технологических параметров (допусков на межоперационные размеры, припусков на обработку, межэлектродного зазора, скорости подачи электрода-инструмента и т.д.). Математическую модель составляют функциональные связи параметров оптимизации с технологическими требованиями к детали на данной операции, организационными требованиями и ограничениями, обусловленными предельными возможностями выбранной технологической схемы ЭХО.

В технологическом проектировании операционные модели представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} F(x_1, x_2, \dots, x_n) &\rightarrow \min(\max) \\ g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_i; i = 1, \dots, m \\ a_{1i} &\leq x_i \leq a_{2i}; i = 1, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где x_i могут принимать значения из множества $[a_{1i}, a_{2i}]$ действительных чисел;

$F(x)$ и $g(x)$ – скалярные функции своих аргументов;

b_i – заданные действительные функции.

Для решения (8) применяются методы линейного и нелинейного программирования.

Рассмотрим простейшую задачу оптимизации – расчет оптимальных технологических параметров ЭХО, где могут быть использованы как методы линейного, так и нелинейного программирования. При проектировании операции обработки должны быть учтены ограничения, связанные с техническими данными конструкции электрода-инструмента, размерами детали и др. Эти ограничения выражаются через параметры переходов – величины припуска, подачи электрода-инструмента, скорости анодного растворения и т.д.

Технологические ограничения:

1. Точность обработки (размеров и формы детали) зависит от погрешности электрода-инструмента и от погрешностей, вызванных отклонениями режима ЭХО от расчетного [4]. Она также определяется припуском на обработку, его неравномерностью, стабильностью процесса анодного растворения по обрабатываемой поверхности и точностью применяемого оборудования. При этом погрешность детали $\Delta_{дет}$ должна быть в пределах допуска

$$\Delta_{дет} = \frac{-(2S_1 + Z_1)/2 \pm \sqrt{(2S_1 + Z_1)^2 + \Delta S_1 + \Delta_0 - Z_1}}{2} \leq [\delta_{дет}], \quad (9)$$

где S_1 – межэлектродный зазор в начале обработки;

Z_1 – толщина слоя металла, удаляемого с заготовки;

Δ_0 – погрешность заготовки;

$[\delta_{дет}]$ – допуск на исполнительный размер.

На точность формообразования детали влияет форма исходной заготовки. Поэтому вводятся ограничения на неравномерность минимального припуска

$$Z_{\min} \geq y_1 + [\delta_{\text{дет}}], \quad (10)$$

где y_1 – сьем металла на участке с минимальным зазором S_y .

2. Качество поверхности характеризуется геометрическими (микрорельеф) и физическими показателями слоя материала, прилегающего к поверхности [5]. Формирование микрорельефа зависит от структуры материала заготовки, электролита (состава, температуры и скорости его прокачки) и электрических параметров режима обработки.

Процесс анодного растворения в каждой точке поверхности протекает по-разному. Отличия практически не влияют на скорость съема, но вызывают образование микронеровностей. Шероховатость поверхности крупнозернистых сплавов выше, чем у сплавов с мелким зерном.

Глубина неровностей профиля поверхности зависит от плотности тока на аноде

$$j_a = \frac{U_{\text{эл}} - [(\Delta\varphi_a) + (-\Delta\varphi_k)]}{\delta S} \chi, \quad (11)$$

где $U_{\text{эл}}$ – омическое падение напряжения в столбике проточного электролита, заполняющего межэлектродный зазор;

$\Delta\varphi_a, \Delta\varphi_k$ – скачки потенциалов на межфазных границах анода-заготовки и катода-инструмента;

S – межэлектродный зазор;

χ – удельная электропроводность раствора электролита.

Величина плотности тока на аноде определяет производительность процесса обработки.

Изменение шероховатости поверхности хромоникелевого сплава X18H10T при различной температуре электролита показано на рисунке.

Как видно из рисунка, при плотностях тока $j_a \geq 0,2-0,3 \text{ А/мм}^2$ высота микронеровностей остается практически постоянной.

Следует учитывать, что применение импульсного тока при ЭХО способствует снижению до 30 % высоты микронеровностей по сравнению с ЭХО с постоянным током.

3. Ограничения, обусловленные кинематическими возможностями станка:

- по частоте вращения шпинделя

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (12)$$

- по подаче катода-инструмента

$$S_{k\min} \leq S_k \leq S_{k\max}. \quad (13)$$

4. Устойчивость процесса обработки обеспечивается условиями неравенства

$$\frac{(U - \Delta\varphi) \chi_0 C_{H_2} R T_0 L}{v_3 p_0 S^2} \leq 1, \quad (14)$$

где p_0 – давление электролита в межэлектродный зазор;

v_3 – скорость течения электролита;

L – длина канала;

χ_0 – начальная удельная электропроводность раствора электролита;

C_{H_2} – электрохимический эквивалент выделения водорода;

T_0 – начальная температура электролита;

R – газовая постоянная.

Применение этого условия позволяет прогнозировать характер протекания процесса ЭХО при назначении режимов обработки в зависимости от величины начального межэлектродного зазора

$$S_{\text{опт}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{(U - \Delta\varphi) \chi_0 C_{H_2} R T_0 L}{v_3 p_0}}. \quad (15)$$

При этом оптимальная плотность технологического тока определяется выражением

$$j_{\text{опт}} = \frac{S_{\text{опт}} v_3 p_0}{3 C_{H_2} R T_0 L}. \quad (16)$$

5. Концентрация продуктов анодного растворения определяется скоростью образования шлама и скоростью их удаления.

При ЭХО в межэлектродном канале имеет место некоторая предельная концентрация продуктов обработки $C_{\text{пред}}$, характеризующая границу устойчивости процесса. Средняя по зазору концентрация продуктов обработки не должна превышать 40 %.

Связь между съемом металла под действием тока и скоростью течения электролита, необходимой для нормального массовыноса можно записать в форме критерия

$$C_{\text{ср}} \leq C_{\text{пред}}, \quad (17)$$

где $C_{\text{ср}}$ – средняя по зазору концентрация продуктов обработки.

В начальный момент концентрация поступившего в зону обработки электролита $C_{\text{вх}}$ равна концентрации электролита находящегося в ванне. Далее этот параметр растет до устано-

вившегося значения на аноде C_a . При этом $C_{\text{вн}} < C_a$, а градиент концентрации изменяется по длине и во времени до наступления установившегося режима обработки.

6. Жесткость катода-инструмента должна быть достаточной, исключаяющей прогиб его рабочей части.

Прогиб катода можно снизить за счет его растяжения с помощью специальных устройств. Без учета упругих свойств самого метода сила для растяжения N определяется как

$$N = \frac{g l_p^3}{8(f_1 + f_2)}, \quad (18)$$

где g – масса катода;

l_p – длина рабочей части катода;

f_1 – прогиб растягивающего троса;

f_2 – фактическая стрела прогиба за счет прогиба трубок.

Учитывая, что в процессе ЭХО прогиб катода не допускается, т.е. $f_1 = 0$, то расчетная сила

$$N \geq k \frac{g l_p^3}{8 f_2}, \quad (19)$$

где k – коэффициент, учитывающий воздействие внешней среды, $k = 1,2-2,0$.

Удельная сила растяжения не должна превышать предела прочности на разрыв σ_E . Исходя из этого условия, диаметр троса

$$d \geq \sqrt{\frac{4N}{\pi \sigma_E m}}, \quad (20)$$

где m – число тросов в катоде.

7. Производительность процесса электрохимической операции обеспечивается необходимым тактом и согласованным ритмом работы электрохимического станка с ритмом работы других станков на участке и в автоматической линии.

Продолжительность цикла работы электрохимического станка

$$T_{\text{ц}} = \frac{60 K_z r_q}{\Pi}, \quad (21)$$

где K_z – коэффициент загрузки станка;

r_q – число одновременно обрабатываемых деталей;

Π – заданная производительность.

Поскольку основное технологическое время $T_o = \frac{l_p}{nS}$, получаем ограничения по производительности

$$nS \geq \frac{n l_p}{60 K_z r_q - T_{\text{вн}} \Pi}, \quad (22)$$

где $T_{\text{вн}}$ – вспомогательное неперекрываемое время.

Объединив все полученные ограничения в систему, будем иметь математическую модель для решения задачи связи оптимизируемых параметров с показателями операции ЭХО, учитывающими технологические возможности системы.

Задача оптимизации состоит в отыскании допустимых режимов такой точки, для которой выбранный критерий оптимальности имеет экстремальное значение, например, минимум основного времени

$$\min T_o = \frac{l_p}{nS} \Rightarrow \max [F(nS)]. \quad (23)$$

Система ограничений (9)-(22) и функция цели (23) являются нелинейными. Для решения такой оптимизационной задачи применяют методы нелинейного программирования.

Аналогичным образом можно решить любую задачу технологического проектирования, где требуется найти оптимальные значения параметров, например, определение оптимальной геометрии электрода-инструмента, оптимальной загрузки оборудования и др.

4. Комплексный подход к оптимизации

Структурная и параметрическая оптимизации взаимно дополняют друг друга. Характер связи между структурной и параметрической оптимизацией определяется принципом сопоставимости, в котором при известных оптимальных значениях технологических параметров (параметрическая оптимизация проведена), структурная оптимизация обеспечивает выбор наилучшего варианта технологической схемы ЭХО.

Принцип сопоставимости предусматривает проведение структурной и параметрической оптимизации одновременно. Математическое выражение единого критерия оптимальности, имеющего смысл минимума приведенных затрат:

$$\min_{1 \leq j \leq M} [(E_n K_j + C_j \Gamma) + \Gamma \min_{T_j \in M_j} C_j (T_j)] \quad , \quad (24)$$

где $T_j = \{t_{i,j}\}$ – вектор технологических параметров на операциях j-го варианта технологической схемы ЭХО;

M_j – множество возможных значений вектора T_j ;

E_n, Γ – общие параметры для всех процессов (E_n выбирают по нормативам, Γ зависит от плана выпуска изделий);

K_j – капиталовложения, зависящие от применяемых в j-ом варианте технологических средств;

C_j – технологическая себестоимость, определяемая видом заготовки, вспомогательными материалами, режимами обработки и т.п.

Комплексный подход к оптимизации технологического процесса происходит за счет формирования выбора параметров оптимизации, охватывающих все задачи проектирования. Кроме параметров режимов обработки на каждой операции большое значение имеют межоперационные припуски и допуски, определение оптимальных значений которых проводится методами параметрической оптимизации. В то же время параметры режимов обработки, припуски, допуски и др. по технологическому значению относятся к структурным элементам, т.к. они оказывают решающее значение на структуру проектируемого технологического процесса.

Большое число технологических ограничений (точность обработки, высота микронеровностей, физико-механические показатели

поверхностных слоев и т.д.) являются функциями режимов электрохимической обработки (плотность тока, скорость подачи электрода-инструмента, скорость течения электролита и т.д.), поэтому комплексная оптимизация должна предусматривать определение оптимальных значений всех технологических параметров с учетом их взаимосвязей с режимами обработки.

Задача комплексной оптимизации технологического процесса многофакторная. Решение ее требует развития научных основ ЭХО и методов оптимизации, позволяющих получить наибольшую производительность, требуемое качество обработанных поверхностей, экономичность.

Литература

1. Рыжов Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. - Киев : Наукова думка, 1989. - 191 с.
2. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др.; под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ, 2008. Ч. 1. 248 с.
3. Технология электрических методов обработки: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев и др. Воронеж: ВГУ, 2001. 310 с.
4. Болдырев А.И. Расчет основных параметров технологического процесса электрохимикомеханической обработки / А.И. Болдырев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.- 2011. -№ 2/2(286). -С. 61-66.
5. Болдырев А.И. Инженерия поверхностного слоя изделий при электрохимической и комбинированной обработке / А.И. Болдырев // Вестник ДГТУ. -2009. -Т. 9. - №4 (43). -С. 627-635.
6. Болдырев А.И. Моделирование процесса комбинированной электрохимикомеханической обработки/ А.И. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2010. -Т.6. -№2. -С. 141-145.

Воронежский государственный технический университет

PROCESSING OPTIMIZATION FOR ELEMENTS ELECTROCHEMICAL MACHINING

A.A. Boldyrev¹, A.I. Boldyrev², A.V. Mandrykin³, A.V. Perova⁴

¹PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

²Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: aiboldyrev@mail.ru

³PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
tel.: (473) 221-06-95

⁴PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: pva7@mail.ru

The article discusses the optimization of electrochemical machining, the basic optimization criteria and the special modeling characteristics for the issue. The main problem of optimization is the formation of a set of technological factors to be optimized, and the determination of optimal values of each technological factor.

Structural optimization provides selection of the best processing mode (technological scheme of electrochemical machining) in the case when optimum values of processing parameters are determined for each option, i.e. parametric optimization is carried out.

Parametric optimization means finding acceptable conditions of such a point, for which the selected optimality criterion has an extreme value. To solve the optimization problem methods of linear and non-linear programming are used. As a result, the optimal values of the parameters are found (the geometry of the electrode-tool, machine work load, etc.).

Complex optimization is performed using the principle of comparability, which includes structural and parametric optimization at the same time. The task of integrated optimization process is multifactorial. Its solution requires the development of scientific bases for electrochemical processing and optimization techniques, allowing to get the best productivity, the required surface quality, efficiency

Key words: optimization, criteria, electrochemical machining

References

1. Ryzhov Je. V., Averchenkov V. I., *"Optimization of machining"* (*"Optimizacija tehnologicheskikh processov mekhanicheskoy obrabotki"*), Kiev, Academy of Sciences Ukrainian SSR, V. Bakul Institute for Superhard Materials, Scientific Thought (1989): 191
2. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., *"The theory of electrical, chemical and physical processing methods. Processing materials using tools"* (*"Teoriya jelektricheskikh i fiziko-himicheskikh metodov obrabotki. Obrabotka materialov s primenieniem instrumenta"*), Voronezh State Technical University 1 (2008): 248
3. A.V. Kuzovkin, A.I. Boldyrev, *"Electrical processing methods technology"* (*"Tehnologija jelektricheskikh metodov obrabotki"*), Voronezh State University (2001): 310
4. Boldyrev A.I., *"Calculation of basic parameters for electrochemicalmechanical processing"* (*"Raschet osnovnykh parametrov tehnologicheskogo processa jelektrihimikomekhanicheskoy obrabotki"*), Fundamental and Applied Problems of Equipment and Technologies 2/2(286) (2011): 61-66.
5. Boldyrev A.I., *"Engineering of the surface layer of pieces at electrochemical and combined treatment"* (*"Inzheneriya poverhnostnogo sloja izdelij pri jelektrihimicheskoy i kombinirovannoy obrabotke"*), The Bulletin of DSTU 9, #4 (43) (2009): 627-635.
6. Boldyrev A.I., *"Simulation of combined electrochemicalmechanical processing"* (*"Modelirovanie processa kombinirovannoy jelektrihimikomekhanicheskoy obrabotki"*), Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta) 6, #2 (2010): 141-145.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЧЕРВЯЧНЫХ КОЛЕС С УЧЕТОМ РАВНОМЕРНОГО ПРИПУСКА ПРИ ОБРАБОТКЕ

О.И. Попова, А.В. Кривошея, М.И. Попова

Использование теории отображения аффинного пространства позволяет в компактном структурном матричном виде представить обобщенную математическую модель прямого и обратного формообразования зубчатых передач, а также разрабатывать математические модели конкретных геометро-кинематических схем формообразования.

В предлагаемой конструкции червячной фрезы благодаря уменьшению рабочей высоты зуба для первого, второго и третьего проходов сокращается длина основания каждого зуба, что дает возможность, не уменьшая прочности зуба, уменьшить угловой шаг зубьев в торцевом сечении и образовывать на том же внешнем диаметре червячной фрезы большее количество реек. Увеличение количества реек даст большее количество профилирующих резцов, что позволяет обеспечить повышение точности обработки, а также уменьшить неравномерность нарезания и динамические нагрузки.

В данной статье получены математические модели формообразования червячных колес с учетом равномерного припуска при обработке. На основе теории отражения аффинного пространства установлены рациональные углы ножи зуба фрезы для второго и третьего проходов, которые находятся в диапазоне $14^{\circ} - 15^{\circ}$, и величина перекрытия профиля, которая составляет 0,25 m. С использованием теории проектирования режущей части зубьев фрезы установлено, что задние углы на вершинном режущем лезвии, близкие к оптимальным значениям $7^{\circ} \dots 9^{\circ}$, рекомендованы для обработки бронзовых венцов червячных колес; задние углы на боковых режущих лезвиях минимальные у фрезы для третьего прохода и находятся в пределах $2,31^{\circ} \dots 4,53^{\circ}$, что является приемлемым.

С полученными рациональными параметрами была изготовлена червячная фреза с разделенным припуском для обработки, которой были нарезаны червячные колеса

Ключевые слова: червячная фреза, червячное колесо, инструментальная рейка, деление профиля

По современным представлениям синтез цилиндрических зубчатых передач осуществляется с учетом их жизненного цикла. Важными этапами жизненного цикла цилиндрических зубчатых передач является их теоретическое и технологическое формообразование [1,2].

С некоторыми допущениями, для черновой обработки или для невысоких степеней точности (12-7-ой степеней) вопросы теоретического и технологического формообразования цилиндрических зубчатых колес совпадают, т.е. за профиль зуба червячной фрезы в нормальном сечении принимается профиль зуба исходного формообразующего реечного контура. [1].

Особенностью теоретического синтеза цилиндрических зубчатых передач с различными, но постоянными вдоль линии зуба торцовыми профилями является тот факт, что синтез их торцовых профилей осуществляется в рамках плоской системы зубчатых зацеплений путем обратного или прямого формообразования [1,2].

Многочисленные аналитические математические модели теоретического формообразования цилиндрических передач с различным, но постоянным вдоль линии зуба профилем, не универсальны и трудоемки, т.е., для каждой формы профиля главной боковой

поверхности предлагается своя аналитическая математическая модель формообразования. Поэтому создание универсальных математических моделей теоретического синтеза цилиндрических зубчатых передач с различным профилем зубьев, охватывающих максимально возможное множество геометро-кинематических схем формообразования, является актуальной научной задачей.

Основой для разработки математической модели формообразования конкретного цилиндрического зубчатого колеса является его геометро-кинематическая схема формообразования.

Использование теории отображения аффинного пространства позволяет в компактном структурном матричном виде представить обобщенную математическую модель прямого и обратного формообразования цилиндрических зубчатых передач, а также разрабатывать математические модели конкретных геометро-кинематических схем формообразования.

Целью данной работы является совершенствование обобщенной и создание частных математических моделей формообразования червячных передач.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Уточнить необходимое количество отображений аффинного пространства реализуемое в обобщенной кинематической схеме формообразования плоских систем зубчатых зацеплений и разработать ее схематическое представление.

2. На основании схематического представления уточненной обобщенной кинематической схемы формообразования разработать уточненную обобщенную

Попова Ольга Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: olga_10_popova@mail.ru

Кривошея Анатолий Васильевич - Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: krivosheyatolja@ukr.net

Попова Маргарита Ивановна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vip.margaritapopova@mail.ru

унифицированную структурную матричную математическую модель формообразования плоских систем зубчатых зацеплений.

3. На основе обобщенной кинематической схемы формообразования плоских систем зубчатых зацеплений и ее математической модели разработать частные геометро-кинематические схемы формообразования плоских систем зубчатых зацеплений и их математические модели.

4. Привести примеры решения конкретных задач технологического формообразования цилиндрических зубчатых передач с различным профилем.

Для реализации этой задачи используем техническую систему разработанную к.т.н. Кривошей А.В., которая включает в себя как теоретическое формообразование, так и технологическое формообразование. Для теоретического формообразования червячного колеса, возможно применение обобщающей кинематической схемы формообразования зубчатых звеньев плоских систем зубчатых зацеплений (рис.1) [2].

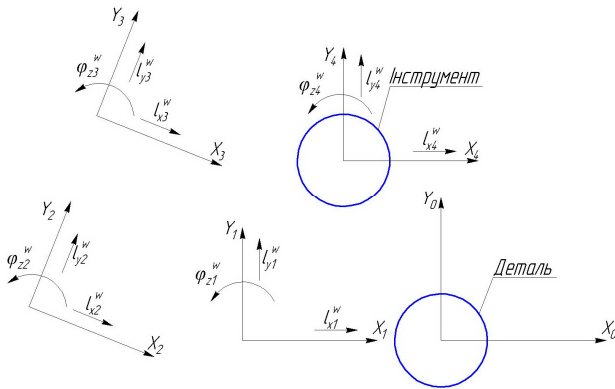


Рис. 1. Обобщенная кинематическая схема формообразования плоских систем зубчатых зацеплений цилиндрических зубчатых колес

Используя теорию многопараметрических отображений аффинного пространства и системы обозначений представленных в работе [2] в более уточненном виде обобщенная унифицированная структурная математическая модель формообразования представлена следующим образом (2):

$$m_{rH/D} = m_{\varphi_0^w} m_{l_0^w} m_{\varphi_1^w} m_{l_1^w} m_{\varphi_2^w} m_{l_2^w} m_{\varphi_3^w} m_{l_3^w} m_{r_{k3}} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2^w &= \varphi_2^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_1^w &= \varphi_1^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_0^w &= \varphi_0^w(\varphi_3^w) \\ l_3^w &= l_3^w(\varphi_3^w) \\ l_2^w &= l_2^w(\varphi_3^w) \\ l_1^w &= l_1^w(\varphi_3^w) \\ l_0^w &= l_0^w(\varphi_3^w) \end{aligned} \right\}$$

$$n_{xk3}(\varphi_3^w) v_{xk3}(\varphi_3^w) + n_{yk3}(\varphi_3^w) v_{yk3}(\varphi_3^w) = 0$$

Однако система уравнений (1) описывает возможный формообразуемый профиль в системе координат заготовки формообразуемого контура, если выполняются все условия формообразования. Для определения профиля исходного

формообразующего контура необходимо выполнить булеву операцию, т.е. определить пересечение контура заготовки и возможного формообразуемого контура исходным формообразующим контуром.

В соответствии с обобщенной кинематической схемой и обобщенной структурной унифицированной математической моделью формообразования цилиндрических зубчатых передач могут быть схематически представлены частные геометро-кинематические схемы формообразования с конкретизацией исходного формообразующего контура и контура заготовки и их математические модели формообразования (табл.).

Частная геометро-кинематическая схема формообразования контура зубчатого колеса и его математическая модель.

Схема формообразования	Математическая модель
	$m_{rH/D(1-2)} = m_{\varphi_2^w} m_{Cy12} m_{l1} m_{rk(1)};$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_2^w \leq \frac{\pi}{4};$ $l_{x1} = K_{lx1} \varphi_2^w;$ $K_{lx1} = -r_{w(2-1)};$ $C_{y12} = -r_{w(2-1)};$ $n_{xk2}(\varphi_2^w) v_{xk2}(\varphi_2^w) + n_{yk2}(\varphi_2^w) v_{yk2}(\varphi_2^w) = 0$

Математическая модель конкретной геометро-кинематической схемы формообразования представленной в таблице получена из обобщенной математической модели путем вычеркивания недействующих операторов движения и координатных операторов.

Для решения конкретных задач формообразования (например при двух отображениях аффинного пространства) необходимо пошагово решить следующие задачи:

1. Задать три плоские системы координат ($S1$, $S2$, $S0$) при двух отображениях аффинного пространства и при совпадении нулевого и первого репера.

2. Задать форму и уравнение исходного формообразующего контура в системе $S2$ и контура заготовки в системе $S0$.

3. Задать кинематическую схему формообразования при двух отображениях аффинного пространства и при совпадении нулевого и первого реперов, т.е. указать на плоскости необходимое число систем координат, их относительное расположение и задать в каждой из систем координат операторы движения, а также пронумеровать все системы координат начиная с нулевой в которой будет задан контур заготовки.

4. На основании кинематической схемы формообразования построить частную геометро-кинематическую схему формообразования с указанием конкретной формы исходного

формообразующего контура и задать его расположение в последней системе координат и формы контура заготовки в нулевой системе координат. Определить относительное расположение контуров, как правило, в один из моментов формообразования, например при совпадении оси симметрии зуба формообразующего контура с межосевой линией.

5. Определить параметрические уравнения исходного формообразующего контура и контура заготовки в своих системах координат.

6. На основании геометро-кинематической схемы формообразования составить частную математическую модель формообразования соответствующую частной геометро-кинематической схеме формообразования:

- Записать уравнение относительного движения исходного формообразующего контура относительно заготовки в системе координат заготовки и уравнения связи между параметрами движения

- Записать уравнения зацепления;
- Определить (возможное) уравнение формообразованного контура

- Записать уравнения пересечения формообразуемого контура и контура заготовки.

В предлагаемой конструкции червячной фрезы (рис. 2), благодаря уменьшению рабочей высоты зуба для первого, второго и третьего проходов сокращается длина основания каждого зуба, что дает возможность, не уменьшая прочности зуба, уменьшить угловой шаг зубьев в торцевом сечении и образовать на том же внешнем диаметре червячной фрезы большее количество реек. Увеличение количества реек дает большее количество профилирующих резцов, что позволяет обеспечить повышение точности обработки, а также уменьшить неравномерность нарезания и динамические нагрузки [3, 4].

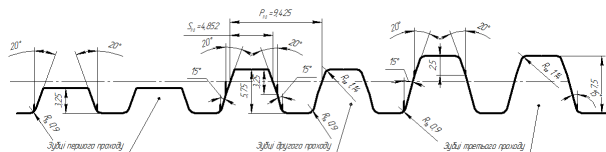


Рис. 2. Профиль инструментальной рейки червячной фрезы $m=3$, $d_{a0}=58,5\text{мм}$

Благодаря тому, что червячная фреза с разделенным профилем по высоте на три части инструментальной рейки одновременно содержит расположенные на одной винтовой поверхности зубья для первого, второго и третьего прохода с одинаковым диаметром впадин и различными внешними диаметрами, обработка червячного колеса осуществляется с одной установки, что обеспечивает повышение точности обработки. Кроме того, затылование и заточка зуба самой фрезы осуществляется также с одной установки, что обеспечивает повышение точности изготовления, уменьшение трудоемкости изготовления и

эксплуатации инструмента [3, 4].

Проиллюстрируем это на примере формообразования исходным формообразующим реечным контуром контура червячного колеса. Для этого будем использовать первую частную геометро-кинематическую схему формообразования контуров цилиндрических зубчатых колес и их математических моделей представленную в таблице. Определим параметрические уравнения исходного формообразующего контура и контура заготовки в своих системах координат. Для этого в соответствии с рис. 2 профиля инструментальной рейки червячной фрезы, математически опишем каждый участок.

Общая схема формообразующего контура представлена на рис.3 на основании которой получены уравнения зубьев первого, второго и третьего проходов.

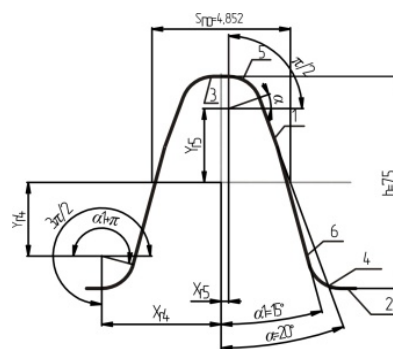


Рис. 3. Выходной формообразующий контур: 1 - боковая сторона, 2 - ножка зуба, 3 - вершина инструментальной рейки, 4 - радиусной участок, 5 - радиусной участок вершины рейки, 6 - дополнительный участок

1. Уравнения для зубцов первого прохода.

Уравнение боковой стороны (рис.3):

$$m_{r1}(l^u) = \begin{vmatrix} l^u \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2} \\ l^u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

Угол наклона $\alpha = 20^\circ$, $S_{no} = 4,852$ в соответствии с чертежом, обеспечивает сдвиг по оси ОХ на заданную величину. l^u – независимый параметр.

Уравнение основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r2}(l^u) = \begin{vmatrix} l^u \cdot \cos(\alpha 2) \\ l^u \cdot \sin(\alpha 2) - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$\alpha 2 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ – высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом (рис.2). l^u – независимый параметр.

Уравнение вершины инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r3}(l3'') = \begin{vmatrix} l3'' \cdot \cos(\alpha 3) \\ l3'' \cdot \sin(\alpha 3) - \frac{h}{2} + 3,25 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

$\alpha 3 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ - высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом. Значение 3,25 - высота инструментальной рейки первого прохода. $l3''$ - независимый параметр.

Уравнение радиусного участка у основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r4}(\varphi 4'') = \begin{vmatrix} R_{fo} \cdot \cos(\varphi 4'') + X_{r4} \\ R_{fo} \cdot \sin(\varphi 4'') + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$R_{fo} = 0,9$, в соответствии с чертежом. X_{r4}, Y_{r4} - координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 2 (рис.3) без точки излома, соответственно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + \frac{R_{fo}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha)} + \frac{S_{no}}{2};$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{fo}.$$

$\varphi 4''$ - независимый параметр, диапазон которого от

$$\alpha + \pi \text{ до } \frac{3\pi}{2}.$$

Уравнение радиусного участка у вершины инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r5}(\varphi 5'') = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos(\varphi 5'') + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin(\varphi 5'') + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$R_{op} = 1,14$, в соответствии с чертежом. X_{r5}, Y_{r5} - координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 3 (рис.3) без точки излома, соответственно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} + \operatorname{tg}(\alpha) \cdot (|Y_{r5}| - R_{op} \cdot \sin(\alpha)) - R_{op} \cdot \cos(\alpha)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 3,25 - R_{op}$$

$\varphi 5''$ - независимый параметр, диапазон которого, от

$$\alpha \text{ до } \frac{\pi}{2}.$$

2. Уравнения для зубьев второго прохода.

Уравнение боковой стороны (рис.3):

$$m_{r1}(l1'') = \begin{vmatrix} l1'' \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l1'' \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

Угол наклона $\alpha = 20^\circ$, $S_{no} = 4,852$ в соответствии с чертежом (рис.2), обеспечивает сдвиг по оси ОХ на

заданную величину, $l1''$ - независимый параметр.

Уравнение основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r2}(l2'') = \begin{vmatrix} l2'' \cdot \cos(\alpha 2) \\ l2'' \cdot \sin(\alpha 2) - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (8)$$

$\alpha 2 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ - высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом. $l2''$ - независимый параметр.

Уравнение вершины инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r3}(l3'') = \begin{vmatrix} l3'' \cdot \cos(\alpha 3) \\ l3'' \cdot \sin(\alpha 3) - \frac{h}{2} + 5,75 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$\alpha 3 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ - высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом (рис.2). Значение 5,75 - высота инструментальной рейки второго прохода.

$l3''$ - независимый параметр.

Уравнение радиусного участка у основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r4}(\varphi 4'') = \begin{vmatrix} R_{fo} \cdot \cos(\varphi 4'') + X_{r4} \\ R_{fo} \cdot \sin(\varphi 4'') + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

$\alpha 1 = 15^\circ$, в соответствии с чертежом (рис.2) угол у основания рейки, $R_{fo} = 0,9$, в соответствии с чертежом (рис.2). X_{r4}, Y_{r4} - координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 2 без точки излома (рис.3), соответственно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot \operatorname{tg}(\alpha 1) + \frac{R_{fo}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha 1)} + \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha 1)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha 1) - \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2};$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{fo}.$$

$\varphi 4''$ - независимый параметр диапазон которого, от

$$\alpha 1 + \pi \text{ до } \frac{3\pi}{2}.$$

Уравнение радиусного участка у вершины инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r5}(\varphi 5'') = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos(\varphi 5'') + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin(\varphi 5'') + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (11)$$

$R_{op} = 1,14$, в соответствии с чертежом (рис.2).

X_{r5}, Y_{r5} - координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 3 без точки излома (рис.3), соответственно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} - tg(\alpha) \cdot (Y_{r5} + R_{op} \cdot \sin(\alpha)) - R_{op} \cdot \cos(\alpha)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 5,75 - R_{op}$$

$\varphi 5''$ – независимый параметр диапазон которого от α до $\frac{\pi}{2}$.

Уравнение дополнительного участка боковой стороны (рис.3):

$$m_{r6}(l6'') = \begin{vmatrix} l6'' \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) - \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l6'' \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) - 1,25 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (12)$$

$\alpha 1 = 15^\circ$, в соответствии с чертежом (рис.2) угол у основания рейки, при этом по оси ОУ прямая сдвинута на -1,25 в соответствии с чертежом (рис.2) т.е. половина высоты рейки это $7,5/2 = 3,75$, $5,75 - 3,75 = 2$ это высота выступающей части боковой стороны над делительной линией, соответственно величина по оси ОУ 20 градусного участка ниже делительной линии равна $3,25 - 2 = 1,25$. Имея значение -1,25 по оси ОУ 20 градусного участка, т.е. первого уравнения, находим координату по оси ОХ:

$$l1'' \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} = X;$$

$$l1'' \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) = -1,25, \quad \text{соответственно}$$

$$X = -\frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2}.$$

3. Уравнения зубьев третьего прохода.

Уравнение боковой стороны (рис.3):

$$m_{r1}(l1'') = \begin{vmatrix} l1'' \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2} \\ l1'' \cdot \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (13)$$

Угол наклона $\alpha = 20^\circ$, $S_{no} = 4,852$ в соответствии с чертежом (рис.2), обеспечивает сдвиг по оси ОХ на заданную величину. $l1''$ – независимый параметр. Уравнение основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r2}(l2'') = \begin{vmatrix} l2'' \cdot \cos(\alpha 2) \\ l2'' \cdot \sin(\alpha 2) - \frac{h}{2} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (14)$$

$\alpha 2 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ – высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом (рис. 2). $l2''$ – независимый параметр.

Уравнение вершины инструментальной рейки (рис. 3).

$$m_{r3}(l3'') = \begin{vmatrix} l3'' \cdot \cos(\alpha 3) \\ l3'' \cdot \sin(\alpha 3) - \frac{h}{2} + 7,5 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (15)$$

$\alpha 3 = 0^\circ$, что обеспечивает параллельность с осью ОХ, $h = 7,5$ – высота инструментальной рейки в соответствии с чертежом (рис.2) для третьего прохода. $l3''$ – независимый параметр.

Уравнение радиусного участка у основания инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r4}(\varphi 4'') = \begin{vmatrix} R_{fo} \cdot \cos(\varphi 4'') + X_{r4} \\ R_{fo} \cdot \sin(\varphi 4'') + Y_{r4} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (16)$$

$\alpha 1 = 15^\circ$, в соответствии с чертежом (рис.2) угол у основания рейки, $R_{fo} = 0,9$, в соответствии с чертежом (рис.2): X_{r4}, Y_{r4} – координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 2 без точки излома (рис.3), соответственно:

$$X_{r4} = |Y_{r4}| \cdot tg(\alpha 1) + \frac{R_{fo}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha 1)} - \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha 1)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha 1) + \frac{1,25}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)} \cdot \cos(\frac{\pi}{2} + \alpha) + \frac{S_{no}}{2};$$

$$Y_{r4} = -\frac{h}{2} + R_{fo}.$$

$\varphi 4''$ – независимый параметр, диапазон которого от $\alpha 1 + \pi$ до $\frac{3\pi}{2}$.

Уравнение радиусного участка у вершины инструментальной рейки (рис.3):

$$m_{r5}(\varphi 5'') = \begin{vmatrix} R_{op} \cdot \cos(\varphi 5'') + X_{r5} \\ R_{op} \cdot \sin(\varphi 5'') + Y_{r5} \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix} \quad (17)$$

$R_{op} = 1,14$, в соответствии с чертежом (рис.2).

X_{r5}, Y_{r5} – координаты центра радиусного участка из условия его сопряжения с участками 1 и 3 без точки излома (рис.2), соответственно:

$$X_{r5} = \frac{S_{no}}{2} - tg(\alpha) \cdot (Y_{r5} + R_{op} \cdot \sin(\alpha)) - R_{op} \cdot \cos(\alpha)$$

$$Y_{r5} = -\frac{h}{2} + 7,5 - R_{op}$$

$\varphi 5''$ – независимый параметр, диапазон которого от α до $\frac{\pi}{2}$.

Уравнение дополнительного участка боковой стороны (рис. 3):

$$m_{r6}(l6^u) = \left| \begin{array}{c} l6^u \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{1,25}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2} \\ l6^u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + 1,25 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right| \quad (18)$$

$\alpha = 15^\circ$, в соответствии с чертежом (рис.2) угол у основания рейки, при этом по оси ОУ прямая сдвинута на 1,25 в соответствии с чертежом (рис.2): т.е. половина высоты рейки это $7,5/2 = 3,75$, $3,75 - 2,5 = 1,25$ это высота выступающей части боковой стороны над делительной линией. Имея значение 1,25 по оси ОУ 20 градусного участка т.е. первого уравнения, находим координату по оси ОХ:

$$l1^u \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2} = X;$$

$$l1^u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) = 1,25, \quad \text{соответственно}$$

$$X = \frac{1,25}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) + \frac{S_{no}}{2}.$$

С помощью пакета «Mathcad», на основе полученных математических моделей, промоделируем поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса для угла ножки зуба от 10^0 до 18^0 (рис. 4 – 9).

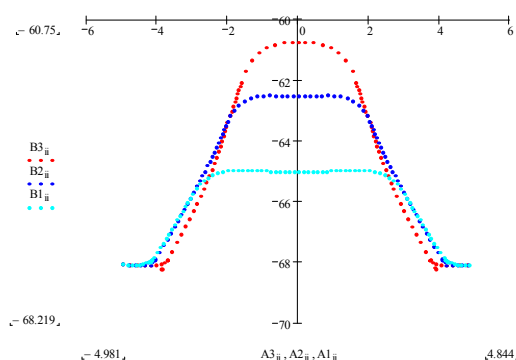


Рис. 4. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 18^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

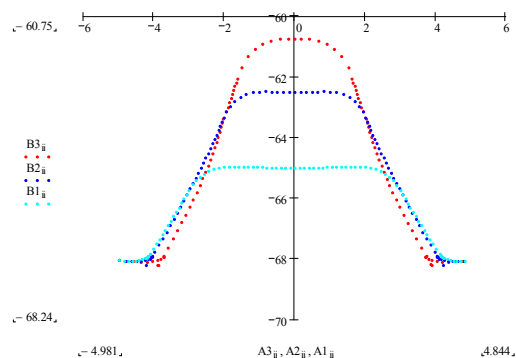


Рис. 5. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 17^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

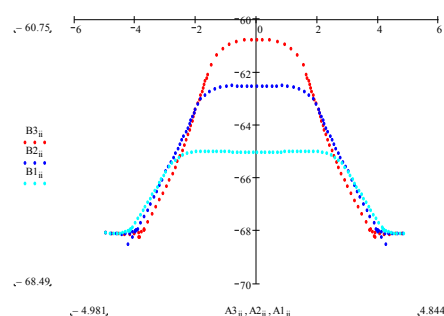


Рис. 6. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 14^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

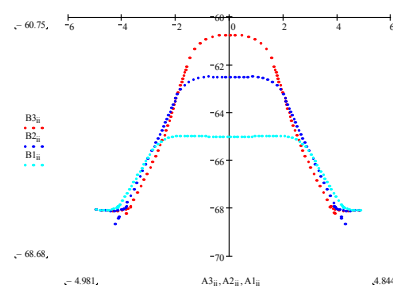


Рис. 7. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 12^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

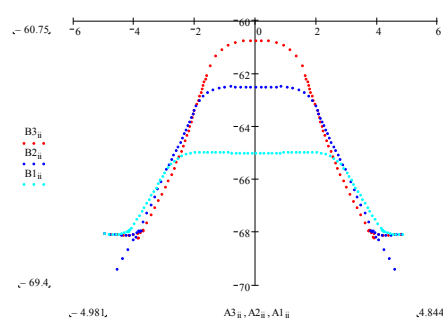


Рис. 8. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 10^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

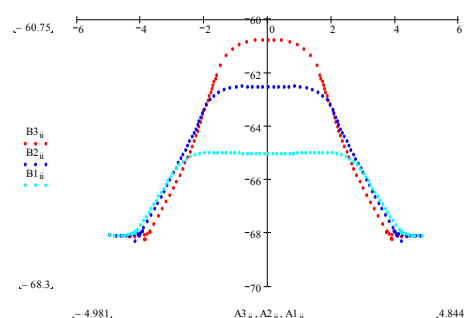


Рис. 9. Поэтапное формообразование профиля зуба червячного колеса (угол ножки зуба 15^0): В1 -первый проход, В2- второй проход, В3 – третий проход

Из анализа рис. 4-9 установлено, что для фрезы с разделенным профилем по высоте на три части инструментальной рейки оптимальное значение угла ножки зуба составляет $14^0 - 15^0$.

Постепенное образование профиля червячного колеса фрезой с оптимальными параметрами промоделировано на рис. 10 - 12.

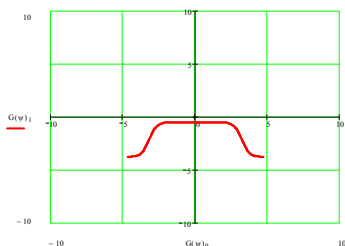


Рис. 10. Профиль зуба червячного колеса, полученный зубьями фрезы первого прохода

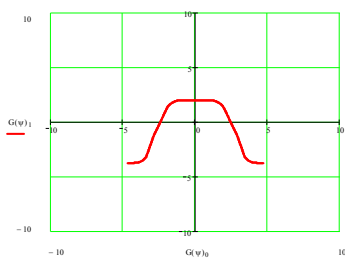


Рис. 11. Профиль зуба червячного колеса, полученный зубьями фрезы второго прохода

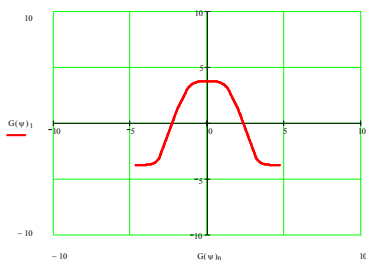


Рис. 12. Профиль зуба червячного колеса, полученный зубьями фрезы третьего прохода

На рис. 13 показана изготовленная червячная фреза с разделенным припуском для обработки с полученными рациональными параметрами инструментальной рейки



Рис. 13. Червячная фреза с разделенным припуском для обработки $m=3$, $d_{a0}=58,5\text{мм}$

На рис. 14 показано нарезание червячного колеса на зубофрезерном станке 5К32А методом тангенциальной подачи фрезой с разделенным по

высоте профилем инструментальной рейки;



Рис. 14. Нарезание червячного колеса на зубофрезерном станке 5К32А фрезой с разделенным по высоте профилем инструментальной рейки

Вывод. Полученные математические модели формообразования червячных колес с учетом равномерного припуска при обработке дают возможность изменяя параметры инструмента моделировать процесс формообразования зуба червячного колеса. На основе теории отражения аффинного пространства установлены рациональные углы ножки зуба фрезы для второго и третьего проходов которые находятся в диапазоне $14^\circ - 15^\circ$, и величины перекрытия профиля, которое составляет 0,25 m . С использованием теории проектирования режущей части зубцов фрезы установлено, что задние углы на вершинном режущем лезвии близкие к оптимальным значениям $7^\circ \dots 9^\circ$, рекомендованных для обработки бронзовых венцов червячных колес; задние углы на боковых режущих лезвиях минимальные в фрезе для третьего прохода и находятся в пределах $2,31^\circ \dots 4,53^\circ$, что является приемлемым.

Установлено, что применение червячных фрез с диаметром, близким к диаметру червяка, и с разделением профиля инструментальной рейки по высоте на три части между фрезами для трех последовательных проходов позволяет увеличить число стружечных канавок в 1,5 - 1,7 раз, что позволяет увеличить число профилирующих резцов.

Литература

1. Зубчатые и червячные передачи. Некоторые вопросы кинематики, динамики, расчета и производства/ ред. Н. И. Колчина. – Л.: Машиностроение, 1974. – 352 с.
2. Кривошея А. В. Математические модели формообразования звеньев плоских систем зубчатых зацеплений/ А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, А. В. Коринец // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 5. – С. 60–76.
3. Попова М.І. Вплив конструкції черв'ячної фрези із поділенням за висотою профілем інструментальної рейки на геометрію черв'ячного колеса [Влияние конструкции червячной фрезы с разделенным по высоте профилем инструментальной рейки на геометрию червячного колеса] / М.І. Попова, О.І. Попова // Машинобудування – очима молодих: збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції. – Кременчук, 2013. – С. 31–32.
4. Ковришкін М.О. Черв'ячна фреза з поділенням профілем інструментальної рейки для обробки черв'ячних коліс методом тангенціальної подачі [Червячная фреза с

разделенным профилем инструментальной рейки для обработки червячных колес методом тангенциальной подачи]/ М.О. Ковришкін, О.І. Садченко// Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла

Остроградського. – Вип. 6(53). – Кременчук: КрДУ, 2008. – С. 69–74.

Воронежский государственный технический университет
Институт сверхтвердых материалов им. В. М. Бакуля НАН Украины, г. Киев

IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR WORM GEARS FORMATION SUBJECT TO EVEN ALLOWANCE AT PROCESSING

O.I. Popova¹, A.V. Krivosheya², M.I. Popova³

¹PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: olga_10_popova@mail.ru

²PhD, Associate Professor, V. Bakul Institute for superhard materials, Kyiv, Ukraine
e-mail: krivosheyatolja@ukr.net

³PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh Russian Federation
e-mail: vip.margaritapopova@mail.ru

The use of the affine space mapping theory makes it possible to present a generalized mathematical model for the direct and inverse gears formation in a compact structural matrix form, as well as to develop mathematical models for specific geometric-kinematic schemes of shape formation.

The base length of each tooth is shortened in the proposed design of the worm cutter, due to the reduction in the working height of the tooth for the first, second and third passes, which makes it possible to reduce the angular teeth pitch in the end intersection and to form a greater number of racks on the same outer diameter of the worm cutter without decrease in the strength of the tooth. The increase in the number of racks gives a greater number of profiling cuts, which allows to increase the accuracy of machining, as well as to reduce the cutting unevenness and dynamic loads.

The article presents mathematical models for gears shaping subject to even allowance during machining. On the basis of the affine space mapping theory, rational angles of the dedendum for the second and third passes are found to be in the range 14° – 15° ; the overlap of the profile is 0.25 m. Using the theory of designing the cutting part of the milling cutter teeth, it is established that the rear corners on the tip cutting blade close to the optimum values of 7° ... 9° are recommended for processing bronze wheel rims; the rear corners on the side cutting blades are minimum for the third pass and are within 2.31° ... 4.53° , which is acceptable.

With the established rational parameters, a worm cutter with a divided machining allowance has been machined and used to cut the worm wheels

Key words: worm cutter, worm wheel, tool rails, profile division

References

1. Kolchina N. I., *“Toothed and worm gears. Some questions of kinematics, dynamics, calculation and production”* (*“Zubchatye i chervyachnye peredachi. Nekotorye voprosy kinematiki, dinamiki, rascheta i proizvodstva”*), Mechanical engineering (Mashinostroyeniye) (1974): 352
2. Krivosheya A. V., Mel'nik V. E., Korinets A. V., *“Mathematical models of forming the links of flat gearing systems”* (*“Matematicheskie modeli formoobrazovaniya zveney ploskikh sistem zubchatykh zatseplenij”*), Superhard Materials (Sverkhhtverdye materialy) 5 (2003): 60–76.
3. Popova M.I., Popova O.I., *“The impact of the construction of worm milling with height divided rack-type tool profile on the worm wheel geometry”*, International Scientific Technological Conference Digest “Mechanical Engineering – The View of the Youth”, Kremenichuk (2013): 31–32.
4. Kovrishkin M.O., Sadchenko O.I., *“Worm mills with the divided rack-type tool profile for the processing of worm wheels by tangential feed”*, Bulletin of Klemenichuk Mikhaïlo Ostrogradskiy National University 6(53) (2008): 69–74.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПЛАТЫ ТРУДА

О.О. Шендрикова, М.С. Луценко

В статье рассматриваются актуальные вопросы применения на промышленных предприятиях сдельной и повременной форм оплаты труда. Приводятся положительные и отрицательные аспекты применения указанных форм с точки зрения работников и работодателей, а также статистика применения повременной формы оплаты труда в странах Западной Европы и США. Описываются формы оплаты труда работников на исследуемом промышленном предприятии. Рассматриваются условия, необходимые для перехода промышленных предприятий города Воронежа на повременную оплату труда с целью решения проблем оптимизации форм и методов оплаты труда. Приводится перечень положений, регулируемых разрабатываемым документом о порядке оплаты труда работников в рамках перехода на повременную систему. Рассматриваются показатели, позволяющие компенсировать потери работников в заработной плате по сравнению со сдельной оплатой труда, а также распределяющие трудоемкость изготовления изделий с целью равномерного распределения загрузки работников в течение смены. Приводится пример формул для расчета данных показателей, применяемых на конкретном промышленном предприятии, позволяющих повысить заинтересованность рабочих в результатах труда, что является предпосылкой увеличения производительности труда и повышения эффективности производства вследствие перехода на повременную форму оплаты. Описываются условия премирования сотрудников в рамках разрабатываемой повременной системы оплаты труда. Рассматриваются формулы для расчета премиального вознаграждения для описанных положений выплаты премий. Описывается размер и источники средств, направляемых на оплату труда сотрудников, определяемые в пределах имеющихся финансовых ресурсов предприятия. Приводится разработанное в рамках перехода на повременную оплату труда положение, регламентирующее состав элементов, входящих в отработанное и неотработанное время

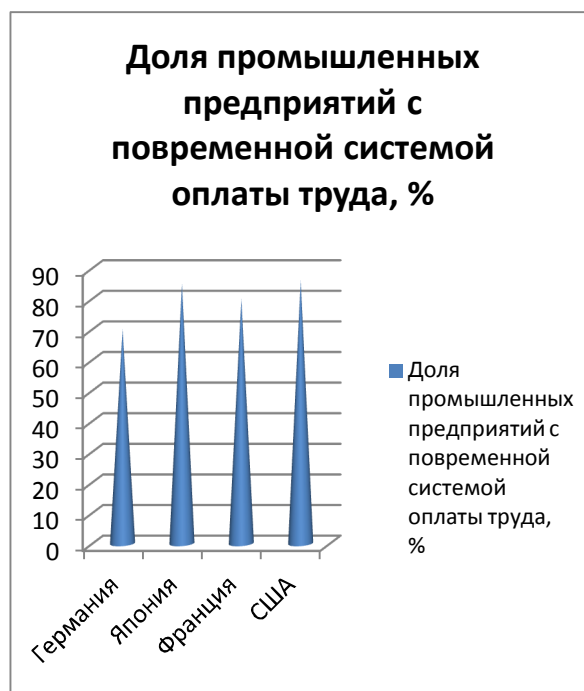
Ключевые слова: эффективность производства, производительность труда, повременная оплата труда, сдельная оплата труда, промышленные предприятия, результаты труда

Введение

В настоящее время многие руководители предприятий в качестве мер по повышению эффективности производства придерживаются на предприятиях принципов повышения качества продукции, снижения диспропорций в объемах выпуска изделий, справедливой оплаты труда.

Перспективным направлением, применяемым в большинстве западных странах, является создание объективных критериев оплаты труда, и переход на повременную оплату труда, как доминирующую форму на производстве (рисунок) [1,3].

Для анализа этой проблемы были проведены исследования на одном из промышленных предприятий г. Воронежа. Анкетирование сотрудников нескольких подразделений с целью выявления степени их удовлетворенности системой оплаты труда в организации позволило сделать вывод о необходимости разработки формы оплаты труда, позволяющей:



Статистика применения повременной системы оплаты труда в странах Западной Европы и США на промышленных предприятиях

- обеспечить усиление мотивации сотрудников в решении стратегических и операционных задач, стоящих перед предприятием;

- применить объективные критерии оплаты труда работников, служащие

Шендрикова Олеся Олеговна – ВГТУ, канд. экон. наук, старший преподаватель, e-mail: oli-shendro@yandex.ru.
Луценко Марина Сергеевна – ВГТУ, канд. экон. наук, доцент, e-mail: luchiksan@rambler.ru.

фундаментом в дифференциации вознаграждений;

- обеспечить материальную заинтересованность сотрудников в творческом и ответственном отношении к выполнению трудовых (должностных) обязанностей;

- достичь упорядоченности системы оплаты труда;

- оптимизировать процесс планирования и управления расходами на оплату труда.

Основная часть

На сегодняшний день, на исследуемом предприятии действуют повременная и сдельная системы оплаты труда. Предполагается, что переход на новую систему оплаты труда, удовлетворяющую условиям, описанным выше, позволит оптимизировать затраты, повысить производительность труда, и, как следствие, повлечет повышение эффективности производства.

Исследования, связанные с разработкой соответствующей системы оплаты труда, касаются детального рассмотрения преимуществ и недостатков повременной и сдельной форм. С точки зрения работодателей и работников, в условиях применения данных форм оплаты труда можно выделить следующие положительные и отрицательные аспекты [2].

В условиях применения на предприятии сдельной формы, работодатели отмечают следующие плюсы:

- прямая заинтересованность работников в увеличении производительности труда;

- ответственность со стороны работника в случае колебания выработки и, соответственно, производительности труда;

- минимизация затрат предприятия, связанных с контролем выполнения работником сменно-суточных заданий.

В качестве отрицательных моментов, по мнению работодателей, выступают:

- наличие постоянного риска снижения качества продукции по причине выполнения больших объемов работ;

- повышение риска увеличения затрат на контроль за качеством сверх плановых значений;

- риск ненадлежащего обслуживания и поломки оборудования вследствие стремления к увеличению объема выработки;

- возникновение угрозы перерасхода сырья и материалов;

- сложности установления норм выработки, в т.ч. при их пересмотре;

- увеличение потребности в специалистах-нормировщиках.

- сложности в определении объема выпуска ввиду отсутствия возможности измерения всех аспектов деятельности работника;

- снижение чувства принадлежности к коллективу;

- отсутствие стимулов к деятельности в долгосрочном периоде, как следствие - увеличение текучести кадров;

- необходимость введения показателей, выравнивающих различия в оплате при уменьшении количества заказов.

С точки зрения работников предприятия, основными положительными моментами в условиях применения сдельной формы оплаты труда являются:

- наличие возможностей увеличения заработка посредством выполнения большего объема работ, увеличения производительности труда;

- возможность получения работы на предприятии вне зависимости от стажа и квалификации.

В свою очередь, в качестве отрицательных тенденций при применении сдельной формы оплаты труда с точки зрения работников является [2]:

- наличие колебаний в заработке;

- возможность недоучета факторов, не зависящих от работников, но влияющих на выработку, на результат трудовой деятельности;

- увеличение вероятности нарушения правил техники безопасности;

- присутствие эффект храповика: опасность снижения ставки заработной платы из-за высокой выработки.

Говоря о применении повременной формы оплаты труда, работодатели выделяют следующие положительные стороны [2]:

- снижение издержек, связанных с контролем за соблюдением качества продукции;

- повышение чувства принадлежности к коллективу организации со стороны работника;

- снижение текучести кадров.

В качестве негативных тенденций, работодателями отмечается:

- отсутствие стимулов к повышению производительности труда со стороны работников;

- необходимость наличия контролирующего органа, осуществляющего

наблюдение за протеканием процесса труда и размерами выработки;

- увеличение издержек предприятия, связанных с осуществлением контроля за деятельностью работников;

- повышение риска в следствии необходимости тщательного отбора высококвалифицированных кадров, способных повысить прибыль предприятия, стремление отказа в найме работникам с низкой квалификаций, отсутствием опыта работы;

- риск колебаний в производительности труда ложится на работодателя.

- возникновение сложностей при увязке размера оплаты труда с конечным результатом трудовой деятельности;

В свою очередь, работники предприятия отмечают следующие положительные моменты применения повременной системы оплаты труда:

- определенность и стабильность в размере заработной платы;

- возможность стабильного заработка на постоянных условиях к объемам работы;

- сплоченность в трудовом коллективе.

В числе минусов повременной формы работники отмечают:

- низкий уровень заработной платы по сравнению со сдельным заработком;

- возможность несоответствия размера оплаты труда и степени трудового участия работника;

- риск равной оплаты труда высоко- и низкопродуктивных работников;

- отсутствие возможности повышения размера заработной платы путем увеличения трудовых усилий.

Из анализа результатов сравнения, можно сделать вывод о том, что в современном высокотехнологизированном и интегрированном производстве, применяющем в своей основе станки с ЧПУ и обрабатывающие центры, преимущественно используется интеллектуальный труд, а не физический, что соответствует условиям применения повременной формы оплаты труда.

Решение в пользу перевода работников на повременную оплату труда обусловлено еще и перспективой лучшего обеспечения качества выпускаемой продукции (в отличии от обеспечения большего количества выпуска), соблюдения условий эксплуатации оборудования, стимулирования новаторской деятельности рабочих, разработки инновационных предложений и проектов, обучения молодых работников [2].

Таким образом, на исследуемом промышленном предприятии целесообразным решением проблем оптимизации форм и методов оплаты труда является разработка повременной формы оплаты труда, регламентирующей следующие положения:

- размер должностного оклада; условия изменения оклада; условия пересмотра фиксированной части заработной платы сотрудника;

- условия оплаты труда в выходные и нерабочие праздничные дни;

- условия оплаты труда при невыполнении норм труда, неисполнении трудовых (должностных) обязанностей;

- оплату труда при невыполнении норм выработки и при изготовлении продукции, оказавшейся браком;

- оплату времени простоя;

- оплату работы в сверхурочное время;

- оплату работы в ночное время;

- оплату труда учеников;

- оплату труда при временном переводе по соглашению сторон;

- условия и размеры выплат стимулирующих надбавок, доплат и выплат к окладам и тарифным ставкам.

При переводе сотрудников на повременную оплату труда по соглашению сторон, руководство предприятия должно разработать ряд показателей, позволяющих компенсировать потери работников в заработной плате по сравнению со сдельной оплатой труда, а так же распределяющих трудоемкость изготовления изделий с целью равномерного распределения загрузки работников в течение смены.

На исследуемом предприятии внедряемая повременная система оплаты труда включает в себя 2 части: основную заработную плату (составляющую примерно 70% оплаты труда рабочих при сдельной форме) и премиальные начисления (рассчитываемые от основной заработной платы). В качестве соответствующих показателей, выравнивающих заработную плату по сравнению со сдельной оплатой труда, были предложены следующие коэффициенты:

Переменная часть денежного вознаграждения:

$$З_{пер.} = З_{фикс.} \cdot П_{пер.} / П_{фикс.}, \quad (1)$$

где $З_{пер.}$ – переменная часть заработной платы;

$З_{фикс.}$ – фиксированная заработная плата (оклад + индивидуальная трудовая надбавка);

Ппер. – процент переменной части заработной платы;

Пфикс. – процент фиксированной части заработной платы.

Показатели премирования устанавливаются отдельно для различных подразделений. Индивидуальная трудовая надбавка устанавливается приказом Генерального директора, размер ее определяется в зависимости от стажа работы, образования, профессионального мастерства, объема выполняемых работ, расширения зон ответственности.

1. Премии по индивидуальному показателю. Индивидуальный показатель включает в себя выполнение операционных планов и задач, стоящих перед сотрудником его непосредственным руководителем:

$$\text{Пинд} = \text{Зпер.} * \text{П\%} * \text{Ф\%}, \quad (2)$$

где Пинд. – премия за выполнение индивидуальных показателей;

П% - доля индивидуального показателя в переменной части заработной платы;

Зпер. – переменная часть заработной платы;

Ф% - фактический процент выполнения индивидуальных показателей, %.

2. Премия за выполнение количественных показателей:

$$\text{Пкол.} = \text{Зпер.} * \text{Ф\%}, \quad (3)$$

Пкол. – премия за выполнение количественного показателя;

Зпер. – переменная часть заработной платы;

Ф% - фактический процент выполнения количественного показателя, %.

Также на предприятии разработаны условия начисления премии, приведены в таблице.

Условия премирования сотрудников предприятия

№ п/п	Показатели премирования	Порядок начисления премии по показателям
1	Отсутствие замечаний	За каждое замечание размер премии снижается на 5%.
2	Выполнение плана-графика ремонтно-строительных работ в период остановочного ремонта	Для всех сотрудников, работающих в период остановочного ремонта в размере 100%.

Продолжение таблицы

3	Соблюдение контрольно-пропускного режима	За каждое замечание размер премии снижается от 5% до 50%.
4	Соблюдение сметы затрат по подразделению	При превышении сметы затрат до 5% КД=0,95; 5-10% КД=0,9; 11-15% КД=0,85; свыше 15% премия по данному показателю не выплачивается.
5	Обеспечение своевременного и качественного контроля выпускаемой продукции	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
6	Выполнение мероприятий по ресурсообеспечению	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
7	Обеспечение своевременного и качественного выполнения должностных обязанностей	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
8	Отсутствие рекламаций на качество выпускаемой продукции	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
9	Обеспечение факта продаж	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
10	Бесперебойное обеспечение энергетическими ресурсами	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.
11	Выполнение планового объема работ	Премия начисляется по формуле: $P=X$, где P -100% премии по данному показателю; X -фактическое выполнение показателя в процентах.

Размер и источники средств, направляемых на оплату труда сотрудников, определяются в пределах имеющихся финансовых ресурсов. Средства на оплату труда формируются за счет заработной платы, включаемой в стоимость продукции и части прибыли, остающейся в распоряжении предприятия. Конкретно, в состав средств, направляемых на оплату труда, включаются:

- суммы на оплату труда производственного персонала в части, отнесенной на себестоимость;
- суммы на оплату труда сотрудников, относящихся к непроизводственному персоналу, занятых на капитальном строительстве, а так же направляемые на единовременные поощрительные выплаты, выплачиваемые за счет прибыли.

Разработанное положение регламентирует состав элементов, входящих в отработанное и неотработанное время.

Таким образом, оплата за отработанное время включает:

- месячную тарифную ставку и оклады в соответствии со штатным расписанием за отработанное время;
- премии за основные результаты производственно-хозяйственной деятельности;
- стимулирующие доплаты и надбавки к окладам за высокую квалификацию, профессиональное мастерство, классность, совмещение профессий и должностей, увеличенный объем работ, руководство бригадой;
- оплату труда при выполнении работ различной квалификации;
- компенсационные выплаты, связанные с режимом работы и условиями труда, а именно: доплаты за работу во вредных условиях и на тяжелых работах, доплаты за работу в вечернее и ночное время, оплата сверхурочной работы и работы в выходные и праздничные дни, санитарные часы;
- оплату труд при переводе на легкий труд в связи с беременностью и болезнью;
- оплату труда за выполнение сверхплановых заказов сторонним организациям;
- премию за сбор и сдачу вторичного сырья;
- расходы на оплату труда сотрудникам, не состоящим в штате предприятия, по заключенным договорам гражданско-правового характера;
- оплата труда лиц, работающих по совместительству.

Оплата за неотработанное время включает:

- оплату ежегодных и дополнительных отпусков;
- оплату учебных отпусков;
- оплату за период обучения сотрудников, направленных на профессиональную подготовку, повышение квалификации или обучение вторым профессиям;
- оплату труда сотрудников, привлекаемых к выполнению государственных или общественных обязанностей;
- оплату сотрудникам-донорам за дни обследования и сдачи крови и отдыха;
- оплату простоев не по вине сотрудника;
- оплату за время вынужденных дополнительных дней отдыха;
- выплату выходных пособий сотрудникам, увольняемым в связи с сокращением численности и штата.

Единовременные поощрительные выплаты, выплачиваемые независимо от источников, регламентированные разрабатываемым положением оплаты труда, включают:

- единовременные премии: за разработку и внедрение новых заданий, техники и технологий, за выполнение особо важных заданий; к юбилейным датам, профессиональным праздникам; при уходе в ежегодный оплачиваемый отпуск;
- вознаграждения, выплачиваемые по итогам работы за год;
- другие единовременные поощрения.

Заключение

Анализируя особенности перевода сотрудников на повременную оплату труда, ключевым моментом, позволяющим компенсировать потери для работников в заработной плате, является разработки вышеописанных показателей, характеризующих положения оплаты труда и премирования, доплат, связанных с соотношением размеров по сдельной и повременной системе оплаты труда. В целом, переход на повременную систему оплаты труда послужит перспективой улучшения качества выпускаемой продукции, соблюдения условий эксплуатации оборудования, стимулирования новаторской деятельности рабочих, и прочих аспектов повышения эффективности производства.

Литература

1. Мазин А.Л. Сдельная и повременная форма оплаты труда: преимущества и недостатки/ А. Л. Мазин: [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.elitarium.ru/oplata-truda-sdelnaja-povremennaja-rezultat-zarabotok-tekuchest-kadrov/>
2. Семенычев Ф.А. Сдельная оплата труда / Ф.А. Семенычев// Стандартизованная работа. Метод

построения идеального бизнеса. 2014. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://leanbase.ru/public/Sdelka.html>.

3. Формы и системы оплаты труда на предприятиях Германии: [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.e-reading.by/chapter.php/89767/14/Ivanova%2C_Zhulina_-_Evropeiiskie_sistemy_oplaty_truda.html.

Воронежский государственный технический университет

INCREASE OF PRODUCTION EFFICIENCY BY MEANS OF CHANGING THE SYSTEM OF REMUNERATION OF LABOR

O.O. Shendrikova¹, M.S. Lutsenko²

¹PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: oli-shendro@yandex.ru.

²PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: luchiksan@rambler.ru.

The article discusses topical issues of application of piecework and time-based forms of payment at industrial enterprises. Positive and negative aspects of application of these forms from the workers' and employers' point of view are shown, as well as statistics on the application of the time-based form of payment in Western Europe and the United States. The forms of payment at the industrial enterprise under study are described. The conditions necessary for transition of Voronezh industrial enterprises to time-based labor compensation are considered with the aim of solving the problems of optimization of forms and methods of labor remuneration. The list of provisions regulated by the document on the payment of labor for employees within the framework of the transition to the time-based system is given. Indicators that make it possible to compensate for the loss of the workers in wages in comparison with piece-rate pay are considered, as well as those that distribute the laboriousness of products manufacturing in order to evenly allocate the workload during the shift. The article gives an example of formulas for calculating these indicators used in the particular industrial enterprise that make it possible to increase workers' interest in labor results, which is a prerequisite for increasing labor productivity and improving production efficiency as a result of switching to the time-based form of payment. The conditions for awarding employees within the framework of the developed time-based wage system are described. Formulas for calculating bonus remuneration for the described bonus payment provisions are considered. The volume and sources of funds directed to employees' remuneration, determined within the available financial resources of the enterprise are described. The position, regulating the composition of the elements comprising worked and not worked time, developed within the framework of the shift to the time-based labor payment is given

Key words: production efficiency, labor productivity, time wages, piece-rate labor, industrial enterprises, labor results

References

1. Mazin A.L., "Piecework and time-based form of payment: advantages and disadvantages" ("Sdelnaya i povremennaya forma oplati tryda: primyschestva i nedostatki"), <http://www.elitarium.ru/oplata-truda-sdelnaja-povremennaja-rezultat-zarabotok-tekuchest-kadrov/>
2. Semenyichev F.A., "Piece-rate labor" ("Sdelnaya oplata tryda"), Standardized work. The method of building an ideal business (2014), <http://leanbase.ru/public/Sdelka.html>.
3. "Forms and systems of labor remuneration at German enterprises" ("Formi i sistemy oplati tryda na predpriyatiyax Germanii"), http://www.e-reading.by/chapter.php/89767/14/Ivanova%2C_Zhulina_-_Evropeiiskie_sistemy_oplaty_truda.html.

КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ПРЕССОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Смоленцев, С.С. Юхневич, В.Л. Мозгалин

В статье рассмотрены особенности протекания процессов комбинированной чистовой обработки прессованных материалов, обладающих различной проводимостью в зависимости от положения электрода-инструмента относительно вектора действия силы при их прессовании. Детали, полученные приведенными в статье методами, максимально приближены к форме готовой детали, но всегда имеются участки, где заданная точность обеспечивается окончательной обработкой. Этот процесс является весьма трудоемким, т.к. порошковые материалы имеют различные механические, тепло- и электротехнические характеристики, где для каждого участка требуется свой технологический режим. Для механической обработки такой процесс трудно осуществить даже с использованием современных материалов инструмента и высокоавтоматизированного оборудования. Все большую востребованность получают электрические методы обработки - часто в комбинации с другими процессами или при сочетании с различными видами тепловых, химических, механических, магнитных, ядерных воздействий. В статье приведены рекомендации по выбору технологических режимов материалов применительно к обработке проволочным электродом, что открывает возможность проектировать новые технологические процессы, в том числе с использованием автоматизированных систем технологической подготовки производства

Ключевые слова: прессованные материалы, удельная электропроводность, комбинированные процессы, технологические процессы, режимы

Введение

В последние годы в транспортном машиностроении стали широко использоваться детали из порошковых и гранульных прессованных материалов. Такие детали могут быть получены с максимальным приближением к форме готовой детали, но всегда имеются участки, где заданная точность обеспечивается окончательной обработкой. Этот процесс является весьма трудоемким, т.к. порошковые материалы имеют различные механические, тепло и электротехнические характеристики, где для каждого участка требуется свой технологический режим. Для механической обработки такой процесс трудно осуществить даже с использованием современных материалов инструмента и высокоавтоматизированного оборудования. Здесь все большую востребованность получают электрические методы обработки - часто в комбинации с другими процессами или при сочетании с различными видами тепловых, химических, механических, магнитных, ядерных воздействий.

Особенности комбинированной обработки прессованных материалов

Прессованные материалы применяются для изготовления металлорежущего инструмента, в деталях основного производства современных конструкций авиакосмической техники, где за счет этого достигнуты хорошие результаты по прочности и удельной массе деталей. Такие материалы могут иметь равномерно распределенные частицы или гранулы, а также

несколько соединенных вместе слоев из различных токопроводящих однородных слоев, обработка которых комбинированными методами зависит от их физико-химических характеристик, в частности от удельного сопротивления материала [1, 2]. Одним из перспективных направлений развития машиностроения является создание и обработка прессованных материалов из порошка и гранул различного состава, сочетание которых выбирается из условий работы изделий при эксплуатации. В условиях производства новой техники обработка таких материалов становится наиболее востребованной в технологии машиностроения и требует научно обоснованного сочетания в одном комбинированном процессе нескольких физических воздействий с новыми (часто не известными) режимными параметрами. Это в большей степени относится к вновь разрабатываемым технологическим процессам, где, наряду с достаточно изученными механическими составляющими, используются электрические, химические, лучевые, магнитные и другие воздействия, учитывающие возможности получения высоких технологических показателей обработки новых материалов, в частности получаемых прессованием.

В основу исследований комбинированного эрозионно-химического процесса обработки прессованных материалов положен принцип подобия, сформированный для машиностроения в [3], где принято, что каждое физическое воздействие в едином процессе не только сохраняет свое полезное воздействие на все структурные составляющие материала детали, но и способно усиливать такое воздействие других факторов, например, химических процессов в зоне обработки. Это может давать труднообъяснимые новые технологические результаты при обработке различных материалов, такие как резкое возрастание (на порядок и более) скорости обработки, снижение шероховатости при

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vsmolen@inbox.ru
Юхневич Сергей Степанович – ВГТУ, аспирант, e-mail: serge1975@yandex.ru
Мозгалин Владислав Львович – ВГТУ, аспирант, e-mail: ptitchki@mail.ru

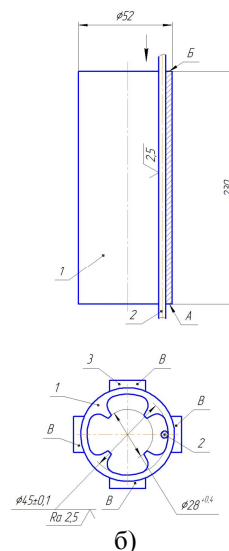
интенсификации процесса съема, что противоречит классическим положениям о назначении режимов черновой и чистовой механической обработки. Практически отсутствуют сведения об изменении электрического сопротивления прессованных материалов и влиянии этого на их обрабатываемость комбинированными методами.

Способы подвода тока при обработке прессованных деталей

В технической литературе не обнаружено глубоких исследований о влиянии способов подвода электрического тока при комбинированной эрозионно-химической обработке прессованных деталей, имеющих различную удельную проводимость в зависимости от положения электрода относительно вектора действия сил при прессовании.



а)



б)

Рис. 1. Схемы подвода тока к длиномерной прессованной детали; а) общий вид детали; б) варианты подвода тока к детали; 1-деталь; 2-электрод-проволока (ЭП); 3-токоподводы к детали. Материал детали ЖГр3Цс4; размер гранул 1,25 мм. Подвод тока: А - со стороны выхода из детали ЭП; А-Б - с торцов детали; А-Б-В - со всех сторон снаружи детали

На рис. 1, а приведена деталь из гранул материала ЖГр3Цс4 (железографит +4% сернистого цинка), где требуется получить точное внутреннее отверстие, чистовая обработка которого традиционными методами (например, протягиванием) хотя и возможна, но в мелкосерийном производстве экономически не выгодна. Здесь наиболее целесообразна комбинированная эрозионно-химическая обработка проволочным электродом. Для этого требуется обосновать положение и места подвода тока к детали, т.к. она имеет большую толщину, ограниченную площадь нижнего торцевого участка, наиболее удобного для совмещения с токоподводом. Всякое усложнение системы токоподводов приводит к повышенным трудозатратам при установке и снятии детали со

станка, поэтому рассмотрено три варианта размещения токоподводов (рис. 1, б): на столе станка и подводом тока через торец детали; с использованием обоих торцов; установкой дополнительных токоподводов к наружной поверхности детали. Различные расстояния от места подвода тока к месту обработки материала, имеющему высокое электрическое сопротивление, возрастающее в направлении, перпендикулярном вектору прессования, вызывают широкое изменение и потери напряжения, что при необоснованном размещении токоподводов вызывает нарушение технологического процесса и технологических показателей, главным образом шероховатости поверхностного слоя, что показано на рис. 2.

$$\chi_{\text{ср}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где χ -электропроводность материала детали.

Для достижения наибольшей точности обработки прессованных материалов из порошков и гранул необходимо соблюдать граничные условия, которые могут соблюдаться за счет обоснованного размещения токоподводов

$$\chi_{\text{max}} - \chi_{\text{min}} \rightarrow \min \quad (2)$$

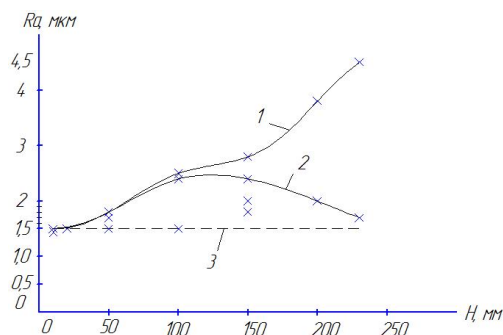


Рис. 2. Изменение шероховатости поверхности места обработки детали ЭП (рис. 1) в зависимости от расстояния до места подвода тока (схемы токоподвода приведены на рис.1, б). Напряжение 280 В. Подвод тока к детали: 1 - со стороны выхода ЭП из детали; 2 - с противоположных сторон; 3 - со всех сторон

Анализ рис. 2 показывает, что при одностороннем токоподводе (рис. 2; 1) с удалением зоны обработки от места подвода тока высота неровностей возрастает до 3 раз и достигает значений, превышающих заданную в чертеже величину, т.е. односторонний подвод может

использоваться для чистовой обработки прессованных минералокерамических и графитизированных деталей с толщиной до 30-50 мм. При двухстороннем подводе тока шероховатость $R_a < 2$ мкм можно обеспечить при удалении от места токоподвода не более 75-75 мм, т.е. для деталей с толщиной до 140-150 мм. Ограничения по толщине деталей при чистовой обработке снимаются в случае 3 на рис. 1, б, но это справедливо только для изделий с ограниченной толщиной боковой стенки.

Технологические режимы при обработке проволочным электродом прессованных деталей

Технологические режимы обработки зависят не только от физических свойств частиц порошка или свойств гранул входящих материалов, но и геометрии, условий прессования деталей, подбора схемы подвода тока, параметров процесса и других факторов.

Применительно к комбинированной обработке непрофилированным проволочным электродом прессованных деталей [4] рекомендации по выбору технологических режимов представлены в таблице.

Режимы комбинированной обработки прессованных материалов проволочным электродом (ЭП)

Обрабатываемые материалы (представитель)	Напряжение на электродах, В (не ниже)	Сила тока, А	Натяжение ЭП, Н	Скорость перемотки ЭП, м/мин	Рекомендуемая скорость подачи ЭП, м/мин
Металлические порошки, гранулы (X17H13M2T)	50	0,1-0,3	20-25	2-6	0,7-2,5
Минералокерамики (ВОК, композиты)	120-150	0,2-0,4	25-30	3-15	0,4-1,7
Железграфитовые (ЖГр3Цс4)	150-180	0,2-0,4	25-30	3-15	0,4-1,5

Сведения, приведенные в таблице, отражают обработку только тех марок прессованных материалов, которые исследовались авторами статьи. В других случаях требуется корректировка режимов, но представленная информация дает достаточно достоверные сведения о рабочих диапазонах изменения параметров, что значительно ускоряет проектирование технологических процессов обработки прессованных материалов. Проведенные исследования показали, что представленные в таблице сведения правомерны как для порошковых, так и гранулированных материалов.

Заключение

Приведенные материалы получены на примере использования проволочного электрода инструмента и раскрывают особенности протекания комбинированных процессов эрозивно-химической обработки деталей из прессованных материалов, содержащих порошковые и гранульные составляющие из материалов с различной удельной проводимостью, зависящей от положения инструмента от вектора

прессования. Это позволяет расширить область использования электрических методов обработки на новые материалы, закладываемые в конструкцию проектируемых изделий современной техники и перспективный режущий инструмент с минералокерамической рабочей частью.

Литература

- Смоленцев В.П. Технологический процесс электрохимической размерной обработки гранульных материалов / В.П. Смоленцев, В.П. Белокуров, В.Н. Старов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т.8. № 2. С. 153-157.
- Смоленцев В.П. Формирование микроповерхности гранульных материалов при комбинированной обработке/ В.П. Смоленцев, В.Г. Грищук, О.Н. Кириллов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 2. С. 40-43.
- Безъязычный В.Ф. Метод подбора в технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2013. - 320 с.
- Смоленцев В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В.П. Смоленцев. М.: Машиностроение, 1967. - 162 с.

COMBINED PROCESSING OF EXTRUDED MATERIALS

V.P. Smolentsev¹, S.S. Yukhnevich², V.L. Mozgalin³

¹Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: vsmolen@inbox.ru.

²Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: serge1975@yandex.ru.

³Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ptitchki@mail.ru.

The article examines the features of combined finishing of extruded materials with various conductivity depending on the provision of the tool-electrode relative to the force vector during the pressing. The component parts made using the methods given in the article have the shape closest to the shape of finished parts, but there are always some areas where the designated accuracy is provided by final processing. This process is very labor-consuming since powder materials have various mechanical, heat engineering and electrotechnical characteristics where each area requires its own technological mode. It is difficult to carry out such mechanical operation even with the use of modern materials, tools and the high-automated equipment. Electric methods of processing are more and more in demand, often in combination with other processes or with different types of thermal, chemical, mechanical, magnetic, nuclear impacts. Recommendations about the choice of the technological modes of materials in relation to processing with wire electrodes are provided in the article, which gives an opportunity to project new technological processes, including those with the use of automated systems of technological preparation of production

Key words: extruded materials, specific conductivity, combined processes, technological processes, modes

References

1. Smolentsev V.P., Belokurov V.P., Starov V.N., “*Technological process of electrochemical dimensional processing of granular materials*” (“*Tehnologicheskij process jelectrohimicheskoj razmernoj obrabotki granul'nyh materialov*”), Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta) 8, # 2 (2012): 153-157.
2. Smolentsev V.P., Gricjuk V.G., Kirillov O.N., “*Formation of micropowered granular materials at combined processing*” (“*Formirovanie mikropoverhnosti granul'nyh materialov pri kombinirovannoj obrabotke*”), (*Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija*) 2 (2012): 40-43.
3. Bezjazychnyj V.F., “*The method of similarity in manufacturing engineering*” (“*Metod podobija v tehnologii mashinostroenija*”), Mechanical engineering (Mashinostroenie) (2013): 320
4. Smolentsev V.P., “*Production of a tool with non-profiled electrode*” (“*Izgotovlenie instrumenta neprofilirovannym jelektrodom*”), Mechanical Engineering (Mashinostroenie) (1967): 162

ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЁВ И ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ПРОЧНОСТИ

А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский

В настоящее время при производстве тонколистовых титановых конструкций предъявляются повышенные требования к качеству поверхности, а именно, регламентированное удаление газонасыщенных слоев и оксидных пленок травлением. По мнению большинства авторов, образование оксидных пленок и газонасыщенных слоев приводит к снижению прочностных и усталостных характеристик основного металла. Однако в литературных данных имеются сведения и о положительном влиянии частично сохранных газонасыщенных слоев на механические свойства, что позволяет снизить безвозвратные потери металла.

В статье детально изучено влияние твердости предварительно сформированных газонасыщенных слоёв и температуры финишного отжига на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности - ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч. С этой целью формировали регламентированные газонасыщенные слои, подвергая образцы высокотемпературному отжигу, пескоструйной обработке и химическому травлению. Испытания образцов на ударную вязкость (КСУ) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 с применением специальных приспособлений.

Показано, что применение оптимальных температур отжига может значительно повысить ударную вязкость сплавов технического титана ВТ1-0 и сплава пониженной прочности ПТ7м. При этом существенное значение имеет протяжённость и микротвёрдость газонасыщенного подслоя

Ключевые слова: поверхностное газонасыщение, отжиг, ударная вязкость

Известно, что при нагреве титановых сплавов при температурах выше 300 °С на поверхности формируются интерференционно окрашенные оксидные плёнки, а при температурах выше 550 °С начинается заметное растворение кислорода в титан, что может приводить к охрупчиванию и снижению эксплуатационной долговечности в условиях динамического нагружения [1]. Преобладает мнение [2-3], что окисленные слои, формирующиеся при нагреве в печах с воздушной атмосферой при температурах не выше 600-650 °С не приводят к заметному ухудшению механических свойств основного металла. Более того, в некоторых работах [4] приводятся данные о том, что при неполном травлении газонасыщенных слоёв достигается эффект некоторого повышения циклической долговечности, что можно было бы использовать при производстве листовых титановых полуфабрикатов с целью снижения безвозвратных потерь титана при травлении.

Одной из важнейших механических характеристик металла является ударная вязкость, которая весьма чувствительна к повышению поверхностной твердости металла при образовании газонасыщенных слоёв. В то же время в литературе практически отсутствуют данные о влиянии поверхностного окисления на ударную вязкость титановых сплавов.

Целью данной работы является исследование влияния газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности.

В качестве материалов для исследований использовали листовые титановые сплавы различных групп прочности, нашедшие широкое применение при изготовлении элементов конструкций летательных аппаратов: технический титан ВТ1-0, сплав пониженной прочности ПТ7М и высокопрочный сплав ВТ6ч.

Изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость КСУ из листов толщиной 1,2 мм, которые изображены на рис. 1. После изготовления образцы подвергали предварительному высокотемпературному воздушному отжигу по режимам 800 °С, 2 ч. (технический титан ВТ1-0) и 850 °С, 1 ч. (сплавы ПТ7м и ВТ6ч) в лабораторной печи с целью формирования достаточно протяженных газонасыщенных слоев рис. 2.

Далее удаляли поверхностную окалину пескоструйной обработкой при избыточном давлении 0,1 МПа и проводили облагораживающее травление в смеси кислот HF и HNO₃ на различную глубину вплоть до полного снятия слоя. В заключение выполняли одночасовой воздушный финишный отжиг в интервале температур 350-650 °С.

Испытания образцов на ударную вязкость (КСУ) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м. Для исключения потери устойчивости и изгиба листовых образцов в процессе испытания применяли специальное приспособление.

На рис. 3-5 представлены результаты испытаний образцов, на ударную вязкость построенные в зависимости $КСУ=f(T)$ при различной глубине травления $I_{тр}$.

Коломенский Александр Борисович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор; ВАСО, главный металлург, e-mail: metallurg@air.vrn.ru

Шахов Сергей Викторович – ВАСО, ведущий инженер-конструктор, e-mail: shahovsv@gmail.com

Коломенский Борис Александрович – ВАСО, канд. техн. наук, помощник директора по качеству, e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

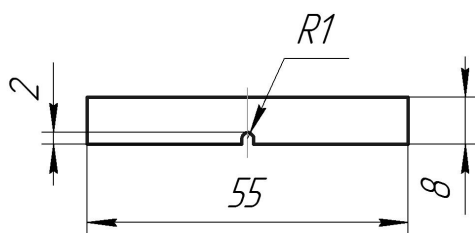
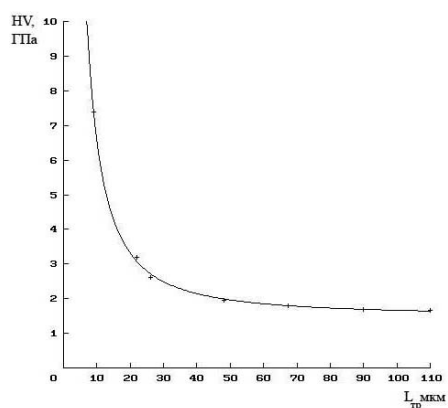
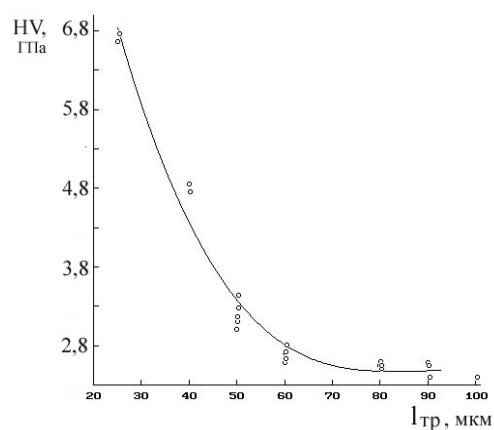


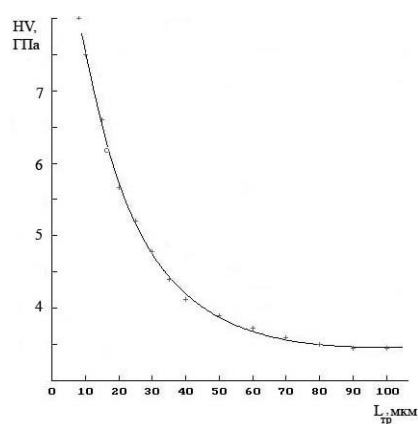
Рис. 1. Образцы для испытаний на ударную вязкость



а

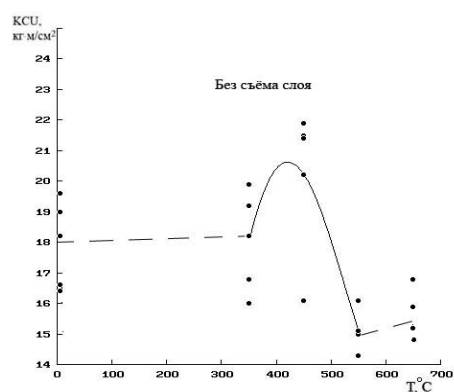


б

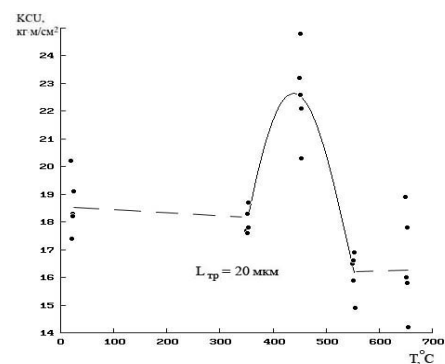


в

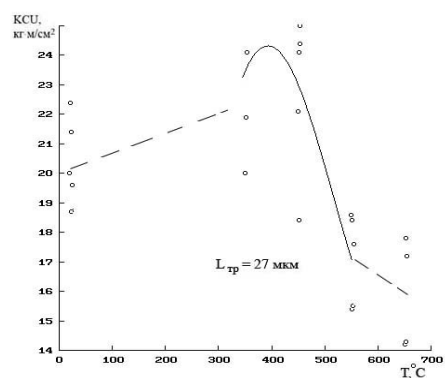
Рис. 2. Зависимость микротвёрдости поверхности образцов после предварительного высокотемпературного отжига от глубины травления: а – для технического титана сплава ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч



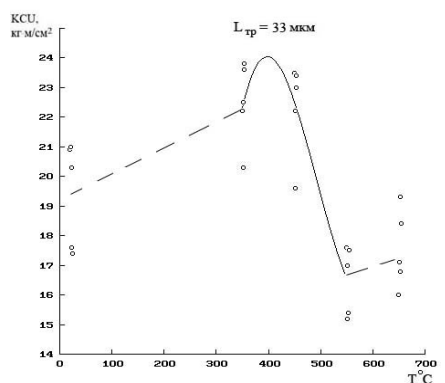
а



б



в



г

Рис. 3. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости $KCU=f(T)$ при различной глубине травления для сплава ВТ1-0: а – с окалиной; б – после пескоструйки; в – 27 мкм; г – 33 мкм; д – 48 мкм; е – 65 мкм; ж – 100 мкм

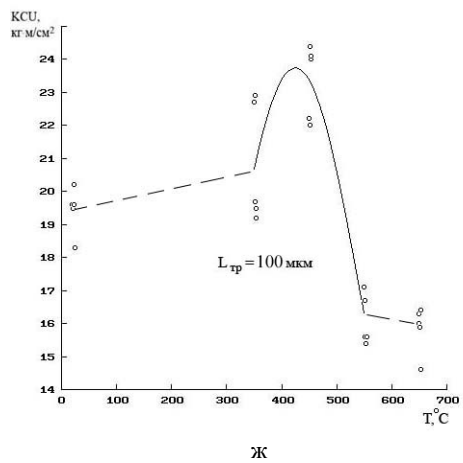
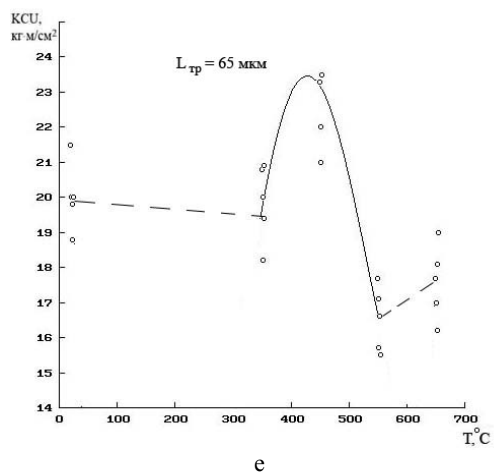
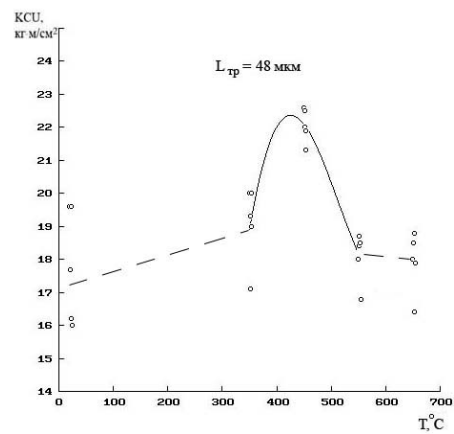


Рис. 3. Продолжение

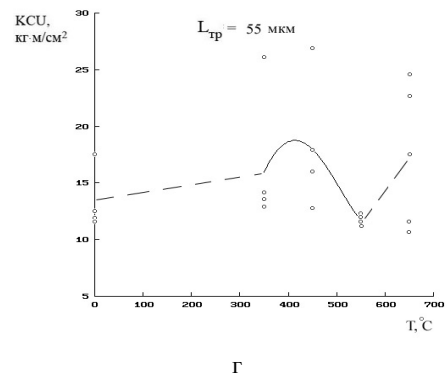
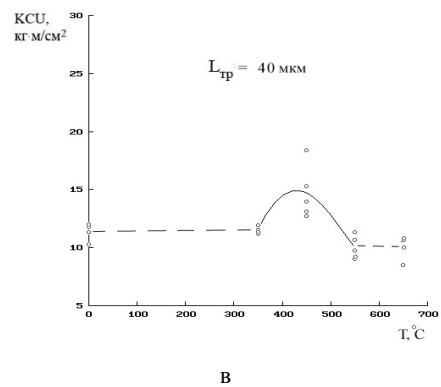
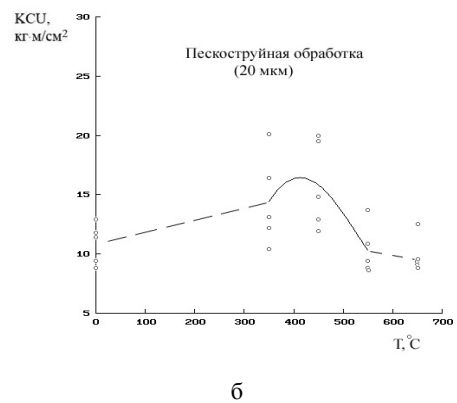
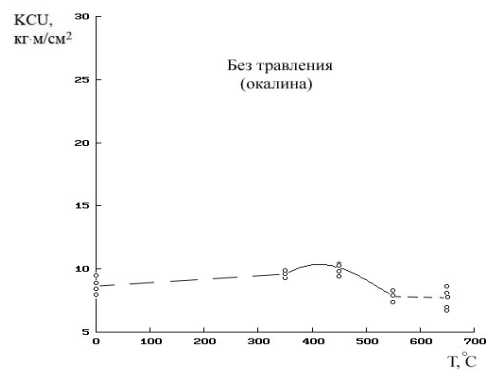


Рис. 4. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости $KCU=f(T)$ при различной глубине травления для сплава ПТ7М: а – с окалиной; б – после пескоструйки; в – 40 мкм; г – 55 мкм; д – 60 мкм; е – 75 мкм; ж – 100 мкм

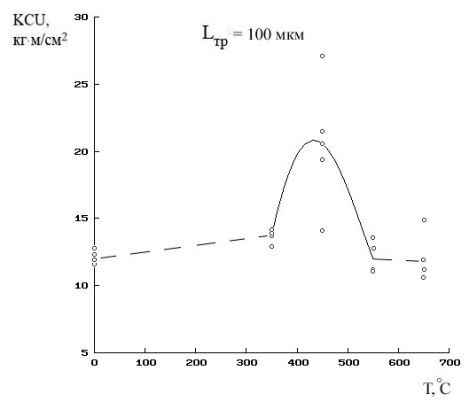
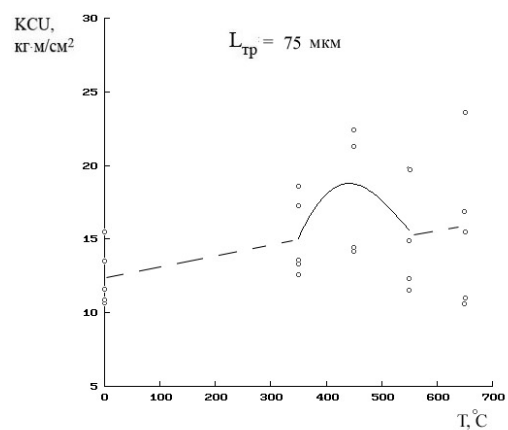
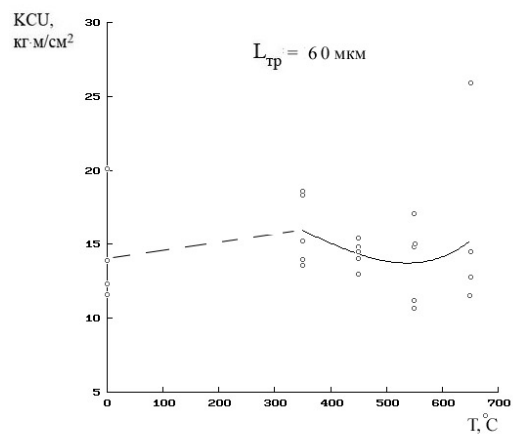


Рис. 4. Продолжение

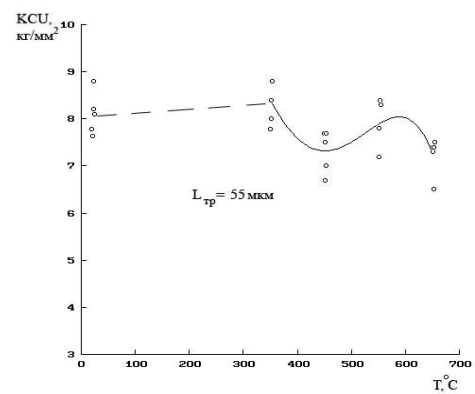
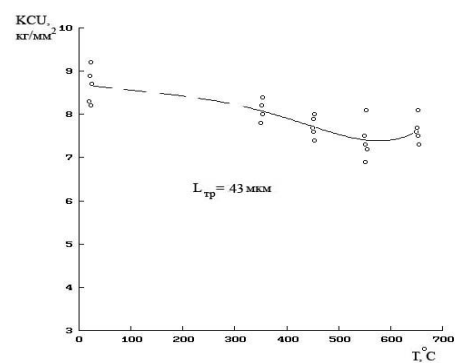
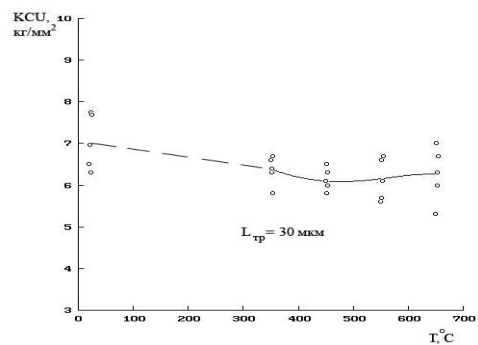
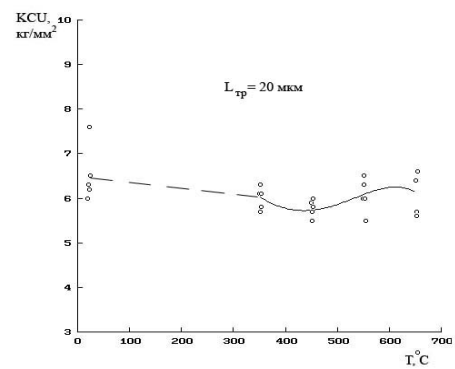


Рис. 5. Результаты испытаний образцов на ударную вязкость в зависимости $KCU=f(T)$ при различной глубине травления для сплава Вгбч: а – после пескоструйки; б – 30 мкм; в – 43 мкм; г – 55 мкм; д – 70 мкм; е – 80 мкм; ж – 100 мкм

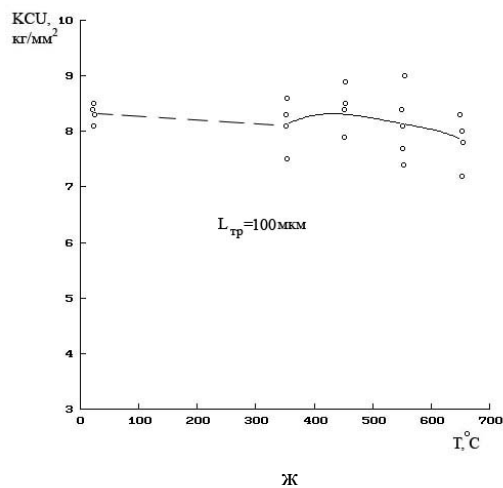
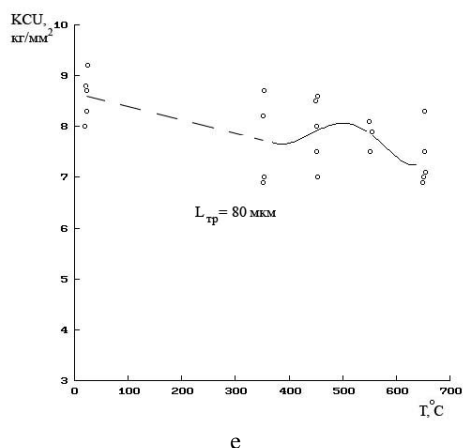
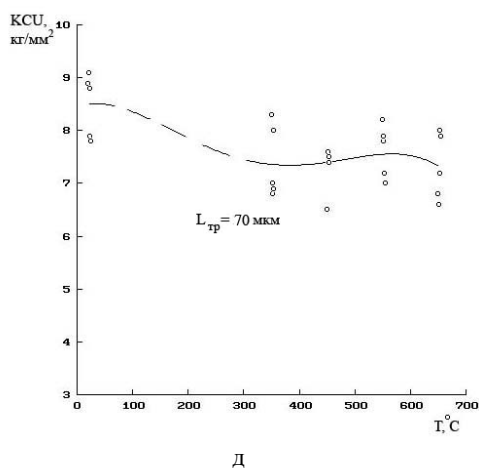


Рис. 5. Продолжение

На основании полученных экспериментальных данных рассчитывали коэффициент $K_c = KCU/KCU_{бс}$, показывающий, какое влияние оказывают разные газонасыщенные подслои при выбранной температуре отжига $T_{отж}$, а также $K_T = KCU/KCU_{б0}$, показывающий, какое воздействие оказывает $T_{отж}$ (оксидная плёнка, формирующаяся при данной $T_{отж}$) при выбранном подслое.

$KCU_{бс}$ – ударная вязкость металла с полностью стравленным газонасыщенным слоем ($\Delta HV=0$) при рассматриваемой $T_{отж}$, а $KCU_{б0}$ – ударная вязкость металла с рассматриваемым газонасыщенным слоем

без финишного отжига. Полученные результаты коэффициентов K_c , K_T для различных сплавов представлены в табл. 1-6.

Таблица 1

Значение K_c для технического титана ВТ1-0

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
280 % (10 мкм)	0,93	0,89	0,91	0,89	1,0
112 % (20 мкм)	0,97	0,92	1,0	0,94	1,07
78 % (27 мкм)	1,08	1,04	0,98	1,0	1,10
48 % (33 мкм)	1,05	1,13	0,98	1,0	1,11
19 % (48 мкм)	0,97	0,96	0,98	1,09	1,13
8 % (65 мкм)	1,0	0,98	0,98	1,0	1,13
0 % (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 2

Значение K_T для технического титана ВТ1-0

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
280 % (10 мкм)	1,0	1,01	1,15	0,85	0,89
112 % (20 мкм)	1,0	1,0	1,22	0,87	0,92
78 % (25 мкм)	1,0	1,01	1,07	0,82	0,84
48 % (33 мкм)	1,0	1,13	1,10	0,85	0,88
19 % (48 мкм)	1,0	1,04	1,19	1,0	0,97
8 % (65 мкм)	1,0	1,03	1,16	0,89	0,94
0 % (100 мкм)	1,0	1,05	1,18	0,89	0,83

Таблица 3

Значение K_c для сплава ПТ7м

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
214 % (22 мкм)	0,84	0,91	0,69	0,82	0,80
74 % (40 мкм)	0,93	0,84	0,73	0,80	0,86
22 % (54 мкм)	1,07	1	0,79	0,93	1,46
12 % (60 мкм)	1,11	1,23	0,73	1,09	1,33
6 % (76 мкм)	1,02	1,09	0,91	1,15	1,36
0 % (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 4
Значение K_T для сплава ПТ7м

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}$, МКМ)	$T_{отж.}, ^\circ C$				
	б/о	350	450	550	650
214 % (22 МКМ)	1,0	1,20	1,37	1,0	0,90
74 % (40 МКМ)	1,0	1,0	1,31	0,88	0,88
22 % (54 МКМ)	1,0	1,04	1,22	0,89	1,30
12 % (60 МКМ)	1,0	1,28	1,10	1,0	1,14
6 % (76 МКМ)	1,0	1,19	1,49	1,15	1,27
0 % (100 МКМ)	1,0	1,11	1,66	1,02	0,95

Таблица 5
Значение K_c для сплава ВТ6ч

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}$, МКМ)	$T_{отж.}, ^\circ C$				
	б/о	350	450	550	650
68 % (20 МКМ)	0,78	0,75	0,69	0,77	0,82
40 % (30 МКМ)	0,84	0,78	0,74	0,78	0,82
16 % (43 МКМ)	1,05	1,0	0,93	0,92	0,98
9 % (55 МКМ)	0,97	1,02	0,87	0,97	0,94
5 % (70 МКМ)	1,02	0,90	0,89	0,95	0,95
3 % (80 МКМ)	1,04	0,95	0,95	0,97	0,95
0 % (100 МКМ)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 6
Значение K_T для сплава ВТ6ч

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}$, МКМ)	$T_{отж.}, ^\circ C$				
	б/о	350	450	550	650
68 % (20 МКМ)	1,0	0,94	0,88	0,95	0,96
40 % (30 МКМ)	1,0	0,90	0,88	0,89	0,89
16 % (43 МКМ)	1,0	0,95	0,88	0,84	0,86
9 % (55 МКМ)	1,0	1,05	0,90	1,0	0,97
5 % (70 МКМ)	1,0	0,88	0,87	0,93	0,93
3 % (80 МКМ)	1,0	0,91	0,91	0,93	0,91

Для титановых сплавов низкой и средней прочности ВТ1-0 и ПТ7м обнаружена устойчивая закономерность, проявляющаяся в достижении максимума KCU при температуре финишного отжига 450 °С.

Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах газонасыщенных подслоев.

Для технического титана ВТ1-0 коэффициент повышения KCU ($K_T = KCU/KCU_{60}$) при $T_{отж.} = 450$ °С в сравнении с вариантом без отжига составляет $K_T = 1,15-1,20$ для всех газонасыщенных подслоев.

Для сплава ПТ7м коэффициент повышения имеет наибольшие значения для чистого металла без газонасыщенного подслоя ($K_T = 1,66$) и с небольшим подслоем с $\Delta HV = 6$ % ($K_T = 1,49$); при больших значениях ($\Delta HV = 12-214$ %) данный коэффициент уменьшается до $K_T = 1,10-1,37$.

Выявленный максимум при $T_{отж.} = 450$ °С по-видимому связан с формированием оптимальной оксидной плёнки, оказывающей выраженное упрочняющее действие и повышающее работу по зарождению и распространению трещины при испытаниях.

Повышение $T_{отж.}$ до 550-650 °С, сопровождающееся дальнейшим ростом оксидной плёнки и одновременным началом растворения кислорода в титане приводит к снижению ударной вязкости титана ВТ1-0 на 10-15 % ($K_T = 0,85-0,90$), а для сплава ПТ7м – возвращению KCU к исходным значениям (без отжига). Указанная тенденция снижения KCU выявляется практически для всех значений ΔHV газонасыщенного подслоя.

При этом, как правило, для $T_{отж.} = 550$ °С значения KCU оказывались ниже, чем при $T_{отж.} = 650$ °С, что можно связать с развитием процесса растворения кислорода в титан.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч выявлена тенденция небольшого (до 10-15%) снижения KCU после проведения финишного отжига во всём. исследованном диапазоне температур 350-650 °С и для всех вариантов газонасыщенных подслоев, причём минимум во всех случаях приходится на $T_{отж.} = 450$ °С.

Это можно объяснить негативным воздействием оксидных плёнок, обладающих упрочняющим воздействием, для высокопрочного металла с ограниченной пластичностью.

Следует отметить, что для чистого металла без газонасыщенного подслоя не отмечается снижения KCU после отжига при $T_{отж.} = 450$ °С.

Исследовали вариант с полностью охрупченной зоной концентратора, когда при изготовлении образца в зоне (отверстия) концентратора после высокотемпературного предварительного отжига при $T_{пр.отж.} = 800-850$ °С сохранялись (не стравливалась) изначальные окалина и газонасыщенный слой. Остальные поверхности образца обрабатывали так же, как и для основной партии, то есть газонасыщенный слой стравливали послойно и проводили финишный отжиг. Таким образом, последующая обработка (послойное травление, финишный отжиг) уже практически не меняла степень охрупченности зоны концентратора, а влияла только на приповерхностные слои зоны распространения трещины.

При анализе результатов обработки экспериментальных данных установлено (табл. 7-8), что оксидные плёнки, формирующиеся в процессе финишного отжига титана ВТ1-0, для всех

газонасыщенных подслоев повышают КСУ: для подслоев с $\Delta HV \leq 19\%$ коэффициент $K_T \leq 1,10$, а для подслоев с $\Delta HV = 38-45\%$ значения коэффициента несколько возрастают до $K_T = 1,17-1,25$. При этом по мере повышения ΔHV максимум КСУ смещается с $T_{отж.} = 450^\circ\text{C}$ на $T_{отж.} = 500^\circ\text{C}$.

Для высокопрочного сплава (табл. 9-10) ВТ6ч с охрупченной зоной концентратора эффект повышения КСУ после финишного отжига проявляется намного сильнее, чем для титана ВТ1-0: для подслоев с $\Delta HV \leq 28\%$ и без подслоя ($\Delta HV = 0$) коэффициент повышения $K_T = 1,6-1,8$, при этом во всех случаях максимум соответствует $T_{отж.} = 350^\circ\text{C}$, а по мере роста $T_{отж.}$ эффект повышения несколько ослабевает (до $K_T = 1,4-1,45$).

Таблица 7
Значения K_c для технического титана ВТ1-0 (охрупченный концентратор)

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
400 % (7,5 мкм)	0,75	0,69	0,70	0,85	0,89
45 % (33 мкм)	0,98	1,06	1,03	1,13	1,08
38 % (37 мкм)	0,97	0,94	1,0	1,05	1,02
19 % (47 мкм)	1,04	0,95	0,98	1,04	1,01
0 % (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 8
Значения K_T для технического титана ВТ1-0 (охрупченный концентратор)

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
400 % (7,5 мкм)	1,0	1,0	1,03	1,23	1,20
45 % (33 мкм)	1,0	1,17	1,15	1,24	1,11
38 % (37 мкм)	1,0	1,05	1,13	1,16	1,06
19 % (47 мкм)	1,0	1,0	1,04	1,08	0,98
0 % (100 мкм)	1,0	1,09	1,10	1,08	1,01

Таблица 9
Значения K_c для сплава ВТ6ч (охрупченный концентратор)

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
68 % (20 мкм)	1,16	0,9	0,98	1,0	1,02
28 % (35 мкм)	0,95	1,0	0,98	1,0	1,0
16 % (43 мкм)	1,03	1,18	1,13	1,02	1,18
9 % (55 мкм)	1,16	1,31	1,31	1,30	1,40
0 % (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 10
Значения K_T для сплава ВТ6ч (охрупченный концентратор)

$\Delta HV, \%$ ($I_{пр.}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, ^\circ\text{C}$				
	б/о	350	450	550	650
68 % (20 мкм)	1,0	1,22	1,28	1,28	1,22
28 % (35 мкм)	1,0	1,65	1,56	1,56	1,45
16 % (43 мкм)	1,0	1,81	1,66	1,48	1,58
9 % (55 мкм)	1,0	1,77	1,71	1,67	1,67
0 % (100 мкм)	1,0	1,57	1,51	1,49	1,38

Выявлено, что для варианта с охрупченным концентратором для всех изученных $T_{отж.}$ максимум значений КСУ приходится на подслои с $\Delta HV = 9\%$.

Таким образом, установлено, что при охрупченном концентраторе для высокопрочного титанового сплава ВТ6ч небольшой газонасыщенный подслои ($\Delta HV = 9-18\%$) в сочетании с оксидной плёнкой, формирующейся при низкотемпературном финишном отжиге ($T_{отж.} = 350^\circ\text{C}$) может заметно увеличить работу по распространению трещины при испытании на КСУ.

Выводы

1. При испытаниях на ударную вязкость для титановых сплавов низкой и средней прочности ВТ1-0 и ПТ7м обнаружена устойчивая закономерность, проявляющаяся в достижении максимума при температуре финишного отжига 450°C , что, по-видимому связано с формированием оптимальной оксидной плёнки, оказывающей выражающее упрочняющее действие и повышающее работу по зарождению и распространению трещины. Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах газонасыщенных подслоев.

2. Для титана ВТ1-0 повышение ударной вязкости при оптимальной температуре отжига в сравнении с вариантом без отжига составляет $\sim 15-20\%$ для всех исследованных газонасыщенных подслоев.

Для сплава ПТ7м наибольший рост ударной вязкости (на $\sim 50-65\%$) достигается для металла без газонасыщенного подслоя и для металла с небольшим перепадом микротвёрдости ($\Delta HV = 6\%$); при больших значениях перепадов ($\Delta HV = 12-214\%$) прирост ударной вязкости снижается ($10-37\%$).

3. При охрупченном концентраторе, когда работа по зарождению трещины минимальна, оксидные плёнки на поверхностях образцов, формирующиеся в процессе финишного отжига, могут заметно увеличить работу по распространению трещины при испытании на КСУ.

Для титана ВТ1-0 при подслое с небольшим перепадом микротвёрдости ($\Delta HV \leq 19\%$) повышение КСУ в пределах 10% , а для подслоев с $\Delta HV = 38-45\%$

% рост КСУ составляет 17-25 %. При этом по мере повышения ΔHV максимум КСУ смещается с $T_{отж.}=450\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $T_{отж.}=550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч эффект увеличения КСУ проявляется значительно сильнее. Для подслоев с $\Delta HV \leq 28$ % повышение КСУ при оптимальной $T_{отж.}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 60-80 %, а по мере роста перепадов микротвёрдости и $T_{отж.}$ полезный эффект несколько ослабевает.

4. Полученные закономерности можно использовать для оптимизации технологических параметров в процессе получения титановых полуфабрикатов, а также при назначении режимов финишного отжига деталей из листовых титановых сплавов.

Литература

1. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев,

В.А. Ливанов, В.И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.

2. Сварные соединения титановых сплавов / В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов, Ю.В. Васькин. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.

3. Глазунов, С.Г. Конструкционные титановые сплавы/ С.Г. Глазунов, В.Н. Моисеев. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.

4. Влияние регламентированного съема травлением поверхностного газонасыщенного слоя на долговечность при малоциклового усталости листов из титана ВТ1-0 / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // Технология легких сплавов. – 1990. – №6. – С. 20–24.

5. Вавилова, В.В. Влияние кислорода на свойства титана и его сплавов / В.В. Вавилова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1973. – №10. – С. 10–14.

Воронежский государственный технический университет
Воронежское акционерное самолетостроительное общество

INFLUENCE OF GAS-SATURATED LAYERS AND OXIDE FILMS ON THE IMPACT TOUGHNESS OF TITANIUM ALLOYS OF DIFFERENT STRENGTH

A.B. Kolomensky¹, S.V. Shakhov², B.A. Kolomensky³

¹PhD, Professor, Voronezh State Technical University; Chief Metallurgist, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation

e-mail: metallurg@air.vrn.ru

²Leading engineer, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation

e-mail: shahovsv@gmail.com

³Assistant quality director, Voronezh Aircraft Joint-Stock Company, Voronezh, Russian Federation,

e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

Nowadays, when producing sheet titanium constructions, it is greatly demanded to make the surface of high quality, notably to remove gas-saturated layers and oxide films by etching. In the opinion of the majority of authors, the formation of oxide films and gas-saturated layers leads to the reduction of strength and fatigue characteristics of the base metal. However, according to literary sources, there are some data about positive effect of partly saved gas-saturated layers on the mechanical properties, which allows to reduce the irretrievable metal loss.

The article studies in details the influence of the hardness of preformed gas-saturated layers and finishing annealing temperature on the impact toughness of titanium alloys of different strength - VT1-0, PT7M and VT6ch. For this purpose regulated gas-saturated layers were formed, exposed to high-temperature annealing, sandblasting and chemical etching. Impact toughness (KCU) tests were taken in accordance with regulations of State Standard 9454-78 with the use of special equipment.

It is shown that the impact toughness of technical titanium VT1-0 and low-strength alloy PT7m can increase significantly under the optimal annealing temperatures. The length and microhardness of gas-saturated sublayer also influence the result

Key words: surface gas-saturation, annealing, impact toughness

References

1. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I., "Metal science and heat treatment of nonferrous metals and alloys" ("Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i spлавov"), Metallurgy (Metallurgia) (1981): 416

2. Moiseev, V.N., Kulikov F.R., Kirilov. U.G., Vaskin U.V., "Welded joints of titanium alloys" ("Svarnye soedinenia titanovykh spлавov"), Metallurgy (Metallurgia) (1979): 248

3. Glazunov S.G., Moiseev V.N., "Structural titanium alloys" ("Konstruktsionnye titanovye splavy"), Metallurgy (Metallurgia) (1974): 368

4. Kolomensky A.B., Kolachev B.A., Degtyarev A.V., Roshchupkin A.N., "Influence of regulated removal made by etching of surface gas-saturated layer on the durability under the condition of low-cycle fatigue of titanium sheet" ("Vliyanie reglamentirovannogo s'ema travleniem poverkhnostnogo gazonasyschennogo sloya na dolgovechnost' pri malotsiklovey ustalosti listov iz titana BT1-0"), Light alloys technology 6 (1990): 20–24.

5. Vavilova V.V., "Influence of oxygen on the properties of titanium and its alloys" ("Vliyanie kisloroda na svoystva titana i ego spлавov"), Metal science and heat treatment of metals 10 (1973): 10–14.

ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ С КОМПЛЕКСОМ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЗАЩИТЫ ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.Е. Барабаш, Д.А. Забелин

Представлены результаты научно-практического обоснования использования поливинилового спирта в качестве пленкообразующего коррозионно-защитных покрытий. Показана перспективность совмещения водорастворимых контактных и летучих ингибиторов коррозии в составе контактной полимерной композиции с достаточным количеством гидроксильных групп, обеспечивающих защитные свойства коррозионно-защитной пленки. Обосновано использование летучего и контактного ингибиторов коррозии – нитрита натрия и циклогексиламина, соответственно. Установлены рациональные соотношения ингибиторов коррозии, обеспечивающих заданные сроки защиты изделий в определенных климатических условиях. Для пленок чистого поливинилового спирта и содержащего комплекс ингибиторов различной концентрации экспериментально установлены значения равновесной сорбции, диффузии и проницаемости воды при 20 °С. На их основе получены уравнения диффузионной проницаемости пленок с варьируемым содержанием ингибиторов коррозии различного типа. Установлено, что при увеличении продолжительности контакта пленки с модельной средой в результате диффузии воды в образец увеличиваются сегментальная подвижность, свободный объем полимерной матрицы и, как следствие, диффузионная проницаемость пленки для субстрата и частиц комплекса, что приводит к более полному проявлению активности. Определена технология получения защитных покрытий на основе водорастворимого поливинилового спирта

Ключевые слова: коррозия, ингибитор, поливиниловый спирт, диффузия

Развитие антикоррозионных технологий обуславливает потребность в расширении ассортимента ингибиторов коррозии и технических средств, позволяющих осуществить управление процессом защиты от коррозии дифференцированно. На сегодняшний день их разработка осуществляется как за счет введения в защитное покрытие активные антикоррозионных препаратов, так и за счет выбора природы защитного покрытия, активно влияющего на процесс коррозионной защиты и обеспечивающего дозированное выделение ингибиторов коррозии в зону защитного действия [1,2].

Полимерные покрытия с иммобилизованными ингибиторами коррозии весьма устойчивы при длительном хранении изделий в складских условиях. При этом сохраняется стабильность ингибитора в покрытиях и его контролируемое дозированное выделение с обеспечением местной поддерживающей концентрации, что обуславливает его расход за счет уменьшения суммарной дозы [3].

В коррозионной практике большое значение имеет физическая форма полимерного покрытия. Наиболее удобной формой представляется гидрофильная пленка, которая плотно соединяется с защищаемой поверхностью. В результате такого плотного контакта активные компоненты целенаправленно десорбируются в зону вероятного разви-

тия коррозии, оказывая необходимое защитное действие. Кроме того очень важно, чтобы пленка обладала регулируемой адгезией для обеспечения ее удаления в кратчайшие сроки при переводе изделий в эксплуатационное состояние.

Иммобилизация ингибиторов в структуре плёнок из водорастворимых полимеров в процессе формирования на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных способов получения материалов коррозионной защиты, поскольку совместно с ингибитором контактного действия может быть иммобилизовано активное вещество другого типа – летучий ингибитор коррозии.

Помимо этого необходимо учитывать и условия формирования позволяющие регулировать структуру полимерного материала и свойства иммобилизованного ингибитора.

В настоящее время существует достаточно обширная номенклатура ингибиторов коррозии, способных к испарению или сублимированию уже при нормальных условиях [3].

С учетом таких особенностей летучих ингибиторов пленочная защиты металлических деталей от коррозии представляется альтернативой временной защите от коррозии с помощью масел, жиров или восков, что становится все более важным с ростом технических рисков при хранении и транспортировке разнообразной техники.

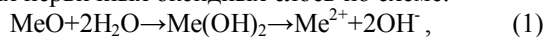
Временная коррозионная защита металлов от воздействия нейтральных водных сред или пленок водного конденсата, преимущественно направлена на предотвращение химического и механического разрушения первичной оксидной пленки присутствующей на поверхности металлов [4].

Первоначальные реакции коррозии металлов

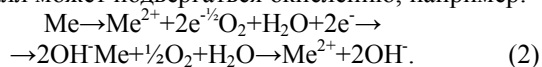
Барабаш Дмитрий Евгеньевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: barabash60170@yandex.ru

Забелин Дмитрий Алексеевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», преподаватель, e-mail: zabelindim1@yandex.ru

(Me) в водных средах всегда заключаются именно в селективном или общем разрушении соответствующих первичных оксидных слоев по схеме:



прежде чем в последующих стадиях обнажившийся металл может подвергаться окислению, например:



Возможность более или менее значительно замедлить эти стадии процесса с помощью летучих ингибиторов коррозии (VCI) и тем самым обеспечить временную защиту от коррозии состоит, например, в применении аминов.

Амины как органические производные аммиака NH_3 при гидролизе реагируют с образованием основания, например: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$.

Причем наряду с гидроксид-ионами OH^- возникают также ионы типа: NRH_3^+ , NR_2H_2^+ или NR_3H^+ , в зависимости от того, применялись ли первичные (NRH_2), вторичные (NR_2H) или третичные (NR_3) амины.

При этом дополнительном образовании OH^- ионов могут быть достигнуты по меньшей мере 2 эффекта:

- снижение тенденции к разложению первичных оксидных слоев (реверсирование реакции (1) влево, то есть в сторону исходных соединений);

- ингибирование восстановления кислорода по реакции (2) как стадии катодной реакции коррозии.

В связи с тем, что большинство аминов при нормальных условиях имеют давление паров или давление сублимации, их применение в качестве летучих ингибиторов коррозии (VCI) оправдано.

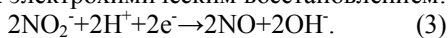
В патентных описаниях (US 600328, US 2419327, US 2432839, US 4051066, US 4275835, DD-PS 284254 и DD-PS 284255), преимущественно называются циклические амины дициклогексилламин и циклогексилламин.

Вместе с тем, очевидно, что только с помощью аминов надежная временная защита от коррозии не обеспечивается.

В связи с этим представляется актуальным дополнительное использование веществ, с функцией пассиваторов. Благодаря этому достигается то, что на поверхностях металлов первичные оксидные слои самопроизвольно возобновляются в качестве оксидного покровного слоя в случае частичного химического разрушения или, соответственно, локального механического нарушения (истирания, эрозии) [5].

В практике защите от коррозии в этом качестве хорошо зарекомендовали себя нитриты (соли азотистой кислоты), использующиеся как контактные ингибиторы коррозии.

Действие нитрит-ионов в качестве окислителя связано с их электрохимическим восстановлением:



Поскольку при этом возникают гидроксид-ионы OH^- , восстановление в водных средах протекает тем менее интенсивно, чем более высоким становится значение pH этой среды.

Поскольку нанесение пленочных защитных

составов, особенно на изделия сложной конфигурации, не обеспечивает полной его изоляции от агрессивной среды (образование микрополостей, вздутий пленки и т.д.) представляется перспективным совмещение водорастворимых контактных и летучих ингибиторов коррозии и полимерных пленкообразователей с достаточным количеством гидроксильных групп в соотношениях, обеспечивающих заданную продолжительность коррозионной защиты.

В связи с этим нами сформулирована цель исследования – а именно: создание пленочной контактной композиции на основе водорастворимого полимера, включающей как летучий, так и контактный ингибиторы коррозии при условии их термодинамической совместимости компонентов и обеспечивающей регулируемое выделение ингибиторов из пленки во время ее эксплуатации.

Для достижения указанной цели необходимо решить две противоречивые задачи. Ингибиторы коррозии должны быть введены в полимерную матрицу и связаны с ней достаточно надежно, чтобы обеспечить работоспособность пленки как единого материала. В то же время связь компонентов не должна быть слишком жесткой и допускать регулируемое выделение ингибиторов из матрицы. Параметры выделения должны обеспечивать допустимые скорость установления защитной концентрации ингибитора и продолжительность ее сохранения в упаковке.

Пленка, используемая таким образом, должна обеспечивать испарение ингибиторов преимущественно с одной стороны, чтобы исключить бесполезные потери ингибиторов.

Ингибированная пленка обеспечивает защиту от коррозии упакованных в нее металлических изделий, если выполняется условие:

$$\tau_0 (m_1 - m_3) + \tau_3 (m_2 - m_3) \geq Q_{\min}, \quad (4)$$

где m_1 и m_2 – скорость выделения паров ингибиторов коррозии внутрь упаковки (m_1 – сразу же после упаковывания изделия, m_2 – после истечения времени τ_0); m_3 – скорость улетучивания паров из упаковки при хранении; τ_0 – время, по истечении которого начинается коррозия изделия в атмосфере; $\tau_3 > \tau_0$ – полное время хранения изделия в упаковке; $Q_{\min}$ – минимальное количество паров ингибитора в упаковке, обеспечивающее защиту изделия от коррозии [5].

Из (4) следует, что сразу после нанесения из пленки должна выделиться «ударная» доза паров ингибитора:

$$\tau_0 (m_1 - m_3) > Q_{\min}. \quad (5)$$

Назначение этой «ударной» дозы ингибитора – предотвратить коррозию изделия, начавшуюся в атмосфере, и сократить время τ_1 накопления в упаковке критического количества паров ингибитора $Q_{\min}$ до значения $\tau_1 < \tau_0$.

После этого ингибитор может выделяться из пленки с «крейсерской» скоростью $m_2 \ll m_1$ или даже $m_2 < m_3$, если выполняется условие (4).

Для выполнения указанного условия необходимо связать как минимум два ингибитора имею-

щих различные скорости испарения, или обеспечить их связывание на различных структурных уровнях матрицы.

Такое связывание обеспечит коррозионную защиту даже после нарушения целостности пленки.

Следующая задача состоит в обеспечении заданной проницаемости пленки, то есть направления диффузии ингибитора преимущественно к поверхности защищаемого металла.

Естественно, что параллельно необходимо обеспечить заданную длительность защитного действия пленки путем снижения ее проницаемости для агрессивных сред.

Рациональное решение указанных задач существенно зависит от климатических условий и технологии нанесения пленки.

На основе анализа существующих разработок и опыта собственных исследований [6], установлено, что экономически выгодно и технически целесообразно использовать водорастворимые полимерные пленки. Указанные пленки не требуют разработки дополнительной технологической оснастки при их изготовлении и нанесении и легко утилизируются без нанесения вреда окружающей среде [7].

Использование воды в качестве растворителя пленкообразующего обуславливает применение водорастворимых ингибиторов, поскольку при этом условии обеспечивается надлежащая иммобилизация активных веществ.

На основе проведенных нами ранее исследований проведен подбор водорастворимого пленкообразователя – поливинилового спирта (ПВС) и водорастворимых ингибиторов коррозии – нитрита натрия NaNO_2 и циклогексиламина.

Поливиниловый спирт – один из наиболее распространенных синтетических водорастворимых полимеров, имеющий широкое применение в различных отраслях промышленности. На основе анализа структурных и кинетических свойств материалов, составляющих твердую фазу, предложена единая классификация систем твердая фаза – распределяемое вещество [1].

Согласно этой классификации поливиниловый спирт в пленочном состоянии относится к непористым материалам. В этих материалах перенос распределяемого вещества характеризуется аномальной диффузией, то есть внутренний массоперенос определяется закономерностями миграции молекул распределяемого вещества между молекулами твердого тела.

Спектроскопические исследования поливинилспиртовых пленок при температурах до 150°C показали наличие полос поглощения, соответствующих как свободным гидроксильным группам, так и связанным водородными связями. Инфракрасной спектроскопией установлено, что при повышении температуры интенсивность полосы $1,60\text{ мкм}$, соответствующей связанным гидроксильным группам падает. Однако при охлаждении эта полоса вновь появляется, что свидетельствует об устойчивости гидроксильных групп в достаточно широком диапазоне температуры [7].

Известно, что наличие в органических соединениях amino- и гидроксильных групп улучшает их защитные свойства [9]. Кроме того, использование поливинилового спирта в качестве пленкообразователя оправдано тем, что практически единственным эффективным растворителем для него является вода, что позволяет использовать водорастворимые ингибиторы коррозии, ассортимент которых достаточно широк.

С увеличением в поливиниловом спирте количества остаточных ацетатных групп от 5 до 30 % (по массе) скорость растворения полимера повышается, а температура растворения понижается. Поливиниловый спирт, содержащий 8...10 % остаточных ацетатных групп, растворяется в воде уже при комнатной температуре. Растворы поливинилового спирта с увеличением содержания в нем ацетатных групп становятся более стабильными, а при содержании более 16 % остаточных ацетатных групп гель вообще не образуется.

В целях регулирования гелеобразования готовых растворов дополнительно к воде использовали диметилформамид (ДМФА), обеспечивающий длительную стабильность водных растворов поливинилового спирта.

В качестве контактного ингибитора атмосферной коррозии металлов использовали нитрит натрия NaNO_2 . В коррозионной защите его используют в виде концентрированных водных растворов (от 25 до 40 %), а также растворов, загущенных глицерином, оксиэтилцеллюлозой или карбоксиметилцеллюлозой [4].

В качестве летучего ингибитора атмосферной коррозии использовали циклогексиламин, который, кроме того, способствовал ускорению пленкообразования поливинилового спирта из раствора.

Пленки отливали из 7...9 %-ного раствора ПВС, содержащего (мас.%): диметилформамид ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) – 3,0...3,5; вода – остальное до 100 %.

Растворителем в данных системах служила двухкомпонентная смесь «вода – ДМФА».

Используя раствор указанного состава, получали ПВС-пленки толщиной 110...120 мкм.

Нитрит натрия, благодаря своей высокой дисперсности, при введении в указанный раствор, выступал как структурообразующий компонент.

Экспериментально установлено, что при введении нитрита натрия в раствор поливинилового спирта происходило ускоренное гелеобразование независимо от температуры раствора. Формование пленок из такого раствора крайне затруднено. В связи с этим предложена двухэтапная технология приготовления рабочего раствора. В первую очередь в воде растворяли необходимую навеску нитрита натрия (НН). Затем в полученный раствор вводили диметилформамид и порционно поливиниловый спирт при постоянном перемешивании. При полном растворении поливинилового спирта вводили циклогексиламин (ЦГА) и при остывании до определенной температуры отливали пленки.

Исследовали влияние температуры подложки на характеристики пленок, в результате чего уста-

новлено, что пленки, сформованные при температуре подложки ниже 5 °С, обладали более низкими прочностными и деформационными характеристиками. Увеличение концентрации NaNO₂ приводило к увеличению прочности материала, но в меньшей степени, чем при формовании пленок при температуре выше 5 °С. Указанные особенности формирования пленок обуславливают температурный диапазон использования разработанного защитного состава.

Предварительная оценка эффективности пленочного покрытия для защиты металлов возможна путем установления скорости диффузии некоторых агрессивных сред сквозь пленочные мембраны содержащих различные количества ингибиторов. Хотя указанный способ не является абсолютно объективным, поскольку рассматривается только мембрана без подложки, но, тем не менее, получение указанных зависимостей обеспечивает исследователя достаточно информативным материалом.

Наиболее доступным реагентом является вода техническая, поэтому исследовали процессы ее взаимодействия с пленками, содержащими как отдельные ингибиторы в различных концентрациях, так и комплексы ингибиторов.

Исследуемые системы являлись довольно сложными, поскольку содержали значительное количество компонентов входящих в состав гидрофильной матрицы – поливинилового спирта, что повышало роль диффузионного фактора в кинетических исследованиях. Кроме того, известно, что полимерные компоненты изменяют свои объемы при контакте с водной средой и в результате возможных взаимодействий (в данном случае электростатических, образования водородных связей) [7].

При выдержке пленки в водной среде в результате диффузии воды происходит интенсивная гидратация компонентов, пластификация матрицы и увеличение подвижности сегментов, что непосредственно влияет на степень проявления коррозионнозащитной активности [11].

Для пленок ПВС с сухим остатком 9 % и содержащего различные концентрации ингибиторов в отдельности и концентрации сочетаний ингибиторов получены значения равновесной сорбции $G_{равн}$ (при $W=100$ %), диффузии D и проницаемости P воды при 20 °С.

Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Так, для пленок, содержащих отдельно нитрит натрия и циклогексиламин получены следующие зависимости значений равновесной сорбции $G_{равн}$, диффузии D и проницаемости P воды при 20 °С от количества указанных ингибиторов x (мас. ч), соответственно:

$$G_{равн. НН} = -0,0029x^2 + 0,506x + 44,259; \quad (6)$$

$$D_{НН} = 0,0003x^2 - 0,0477x + 7,4891; \quad (7)$$

$$P \cdot 10^{14}_{НН} = 0,0001x^2 - 0,0235x + 7,5043; \quad (8)$$

$$G_{равн. ЦГА} = -0,0286x^2 + 1,7768x + 47,637; \quad (9)$$

$$D_{ЦГА} = 0,0001x^2 - 0,0264x + 5,7061; \quad (10)$$

$$P \cdot 10^{14}_{ЦГА} = 0,0002x^2 - 0,0383x + 5,4269. \quad (11)$$

Для пленок, содержащих комплекс ингибито-

ров, аналогично получены соответствующие зависимости:

- для циклогексиламина фиксированного на уровне 5 мас. ч. при изменении концентрации $x_{НН}$ (мас. ч), нитрита натрия:

$$G_{равн. (НН+ЦГА)} = -0,0241x_{НН}^2 + 1,0315x_{НН} + 43,13; \quad (12)$$

$$D_{(НН+ЦГА)} = 0,0002x_{НН}^2 - 0,0309x_{НН} + 7,48; \quad (13)$$

$$P_{(НН+ЦГА)} \cdot 10^{14} = 0,0001x_{НН}^2 - 0,0225x_{НН} + 5,41. \quad (14)$$

- для нитрита натрия фиксированного на уровне 5 мас. ч. при изменении концентрации $x_{ЦГА}$ (мас. ч), циклогексиламина:

$$G_{равн. (НН+ЦГА)} = -0,02x_{ЦГА}^2 + 0,805x_{ЦГА} + 43,44; \quad (15)$$

$$D_{(НН+ЦГА)} = 0,0001x_{ЦГА}^2 - 0,028x_{ЦГА} + 7,495; \quad (16)$$

$$P_{(НН+ЦГА)} \cdot 10^{14} = 0,0001x_{ЦГА}^2 - 0,023x_{ЦГА} + 5,63. \quad (17)$$

Таблица 1

Термодинамические характеристики пленок ПВС (с.о. 9 %) с одиночными ингибиторами различной концентрации

№	Состав пленки, мас.ч.	$G_{равн.}$ кг/м ³	$D \cdot 10^8$, см ² /с	$P \cdot 10^{14}$, м ² /(ч·Па)
1	без ингибиторов	43	7,8	5,8
2	НН:5	44	7,1	5,6
3	НН:10	54	6,8	5,3
4	НН:50	61	6	4,8
5	НН:100	66	5,8	4,5
6	ЦГА:5	48	7,2	5,2
7	ЦГА:10	55	7,1	4,6
8	ЦГА:50	63	6,8	4,3
9	ЦГА:100	65	6,6	4

НН – нитрит натрия, ЦГА – циклогексиламин

Таблица 2

Термодинамические характеристики пленок ПВС (с.о. 9 %) с комплексом ингибиторов различной концентрации

№	Состав пленки, мас.ч	$G_{равн.}$ кг/м ³	$D \cdot 10^8$, см ² /с	$P \cdot 10^{14}$, м ² /(ч·Па)
1	без ингибиторов	43	7,8	5,8
2	НН:ЦГА (5:5)	55	6,8	5,3
3	НН:ЦГА (10:5)	64	6	4,8
4	НН:ЦГА (50:5)	69	5,8	4,5
5	НН:ЦГА (100:5)	71	5,1	4,2
6	НН:ЦГА (5:10)	64	7	5,2
7	НН:ЦГА (5:50)	69	6,6	4,8
8	НН:ЦГА (5:100)	72	6,2	4,3

НН – нитрит натрия, ЦГА – циклогексиламин

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что при возрастании длительности выдержки пленки в воде свободный объем полимерной матрицы увеличился, что обусловило, соответственно, и увеличение диффузионной проницаемости пленки для ингибиторов. Указанное обстоятельство на наш взгляд и обеспечивает более полное проявление активности ингибиторов.

Поскольку структура тонкопленочных композиций весьма сильно зависит от их состава [9], следует ожидать изменения и всего комплекса свойств полимерного материала от вида и количества вводимых наполнителей, что и нашло отражение в уравнениях 6-17.

Установлено, что циклогексиламин по степе-

ни влияния на свойства пленок лишь незначительно отличался от нитрита натрия.

Вместе с тем, комплексное введение указанных ингибиторов объективно изменило характер равновесной сорбции $G_{равн}$. В диапазоне концентрации комплексного введения ингибиторов 55...60 и 100...110 мас. ч. наблюдались два экстремума, максимальный и минимальный, что возможно объяснить изменением сорбционной способности наполнителей и формирования более жесткой структуры пленок при увеличении концентрации ингибиторов.

Следует отметить, что указанные уравнения получены для диапазона концентрации ингибиторов при фиксированной температуре 20 °С.

Очевидно, что повышение температуры значительно изменит термодинамические характеристики испытуемых пленок, но для сравнительного анализа проницаемости полученных данных вполне достаточно.

На следующем этапе исследования согласно требованиям ГОСТ 9.509-89 проводили имитационные испытания – для оценки защитной способности в условиях, имитирующих реальные условия хранения и транспортирования законсервированных изделий [10, 12].

Метод испытаний назначили в соответствии с требованиями ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды».

Для испытаний изготавливали плоские металлические пластины прямоугольной формы, размер которых соответствовал требованиям ГОСТ 9.905, защищенные средством временной защиты на основе поливинилового спирта с заданным количеством летучего ингибитора. Количество образцов в серии составляло не менее девяти, количество серий не менее трех, что обеспечивало достоверную вероятность не менее 0,95.

Для каждой серии оставляли по три незаконсервированных образца с хранением в эксикаторах с влагопоглотителем.

Покрывают получали из растворов поливинилового спирта, содержащих комплекс ингибиторов в заданном сочетании, способом безвоздушного напыления на защищаемую подложку.

Применяемая аппаратура: камера солевого тумана, тепла и влаги по ГОСТ 9308, камера холода по ГОСТ 20 57406.

Агрессивные среды готовили растворением в дистиллированной воде хлористого натрия и сернистого натрия. Контролируемым параметром служил pH раствора, который варьировался в пределах 6,8..7,2 и при необходимости корректировался введением соляной кислоты. Для каждого цикла испытаний готовили свежий раствор. Применение указанных реактивов обеспечивало одновременное воздействие солевого тумана и сернистого газа.

Испытания проводили в течение определенно-

го количества циклов до появления первых признаков коррозии. За максимально допустимый коррозионный очаг принимали видимое невооруженным глазом и обнаруженное только на одном из испытываемых образцов:

- одно точечное поражение диаметром не более 2 мм;

- два точечных поражения диаметром каждое не более 1 мм.

Испытательный цикл составляла последовательность воздействий с параметрами, указанными в табл. 3.

Режимы и продолжительность одного цикла регламентированы ГОСТ 9.509-89 [10]. За начало испытаний принимали начало распыления солевого раствора в камере при установленной температуре. При этом определяли минимальную защитную концентрацию ингибитора, а также его предельно допустимую концентрацию для исключения отрицательного воздействия на неметаллические покрытия и материалы. В связи с этим дополнительно проводили испытания на определение степени защиты металлов с лакокрасочными покрытиями в соответствии с требованиями ГОСТ 9.407-2015 «ЕСЗКС. Покрывают лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида».

Таблица 3

Параметры испытательного цикла	
Наименование воздействия и единицы измерения	Значение
Воздействие солевого раствора	
концентрация сернистого газа, мг/м ³	20±2
температура, °С	35±2
продолжительность, ч	2
Воздействие температурно-влажностного комплекса:	
а) повышенная температура	
относительная влажность воздуха не более, %	50±3
температура, °С	60±2
продолжительность, ч	12
б) повышенная влажность при повышенной температуре без конденсации влаги	
температура, °С	55±2
относительная влажность воздуха не более, %	95±3
в) повышенная влажность при повышенной температуре с конденсацией влаги	
продолжительность, ч	62
температура, °С	45±2
относительная влажность воздуха не более, %	94-100
продолжительность, ч	12
г) холод	
температура, °С	-60±2
продолжительность, ч	6
Выдержка в нормальных климатических условиях испытаний по п. 3.15 ГОСТ 1515	
продолжительность, ч	2

Выводы

По результатам испытаний установлено, что максимальную степень защиты испытуемых образцов обеспечивали пленки, содержащие нитрит натрия и циклогексиламин в соотношении 60:40 мас.ч. Указанный компонентный состав выдержал более 70 циклов ускоренных испытаний без коррозионного поражения защищаемого металла и

нарушения внешнего вида полимерной облицовки.

Анализируя данные, полученные в ходе эксперимента, установлено, что защитные свойства предлагаемого покрытия определяются совокупностью взаимосвязанных физико-химических свойств, среди которых наиболее значимыми являются: химическая стойкость полимерной матрицы в коррозионной среде; механическая прочность и адгезия пленки к подложке и их сохранение в процессе хранения; диффузионная проницаемость в отношении коррозионно активных сред; степень набухания полимерной матрицы при длительной выдержке в агрессивной среде.

Указанные физико-химические свойства обуславливаются не только компонентным составом пленок, но и природой взаимодействия ингибиторов и полимерного связующего.

В связи этим, с целью выяснения влияния вида и количеств ингибиторов различной природы совмещенных в комплекс, на свойства защитных поливинилспиртовых пленок планируется проведение широкого круга исследований, включая изучение структуры пленок на микроуровне и получение ИК-спектров пленок с различным содержанием комплекса ингибиторов.

Литература

1. Kunze, E. Korrosion und Korrosionsschutz / E. Kunze// Wiley-VCH. –2001. –Т. 3. –р. 1680.
2. Определение параметров эффективности пленкообразующих ингибиторов коррозии / А.В. Куршаков, С.И. Нефедкин, В.А. Рыженков, А.Н. Кукушкин// Новое в российской электроэнергетике. – 2008. –№7. –С. 38-43.
3. Vuorinen, E. Introduction to vapor phase corrosion inhibitors in metal packaging / E. Vuorinen, E. Kalman, W. Focke //Surface Engineering. – 2000. – Т. 20. pp. 281-445.

4. Наружная консервация энергетического оборудования с использованием пленкообразующих аминов / Г.А. Филиппов, А.Н. Кукушкин, В.А. Михайлов, Е.В. Величко, А.В. Михайлов //Тяжелое машиностроение. –2005. –№ 3. –С. 2-4.

5. Трусов, В.И. Вопросы термодинамики ингибирования атмосферной коррозии / В.И. Трусов// Защита металлов. –1986. —Т.22. №6. –С.966-970.

6. Барабаш, Д.Е. Пленочная коррозионная защита – составная часть жизненного цикла техники / Д.Е.

Барабаш, Д.А. Забелин// Инновационные технологии и оборудование машиностроительного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2015. – Вып. 18. С. 227-232.

7. Алешина Е. Ю. Получение и свойства полимерных композиций и пленочных материалов на основе поливинилового спирта, содержащих протеазу С и полигексаметиленгуанидин / Дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06 М, 2003 145 с. РГБ ОД, 61:04-2/125-8

8. Применение полианилина в области защиты от коррозии (обзор) / С.Н. Степин, С.А. Ситнов, С.И. Толстошеева, С.П. Михеев// Практика противокоррозионной защиты. –2014. –№ 4(74). –С. 44-56.

9. Защитные покрытия на основе синтетических каучуков/ К.В. Сухарева, Ю.О. Андриясян, И.А. Михайлов, А.А. Попов //Пластические массы. –2015. –№11-12. –С. 57-63.

10. ГОСТ 9.509-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности. – Введ. 1990-01-02. –М.: Издательство стандартов, 1989. – 34 с.

11. Определение параметров относительной эффективности пленкообразующих ингибиторов коррозии / А.В. Куршаков, С.И. Нефедкин, В.А. Рыженков, А.Н. Кукушкин // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. –2008. –№6. –С. 51-56

12. Михайлов, А.А. Моделирование атмосферной коррозии металлов и виды функций доза-ответ / А.А. Михайлов, П.В. Стрекалов //Коррозия: материалы, защита. –2006. –№3. –С. 2-13.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

POLYMERIC COATINGS WITH CORROSION INHIBITORS COMPLEX FOR ADJUSTABLE PROTECTION OF PRODUCTS OF DIFFERENT FUNCTIONS

D.E. Barabash¹, D.A. Zabelin²

¹Full Doctor, Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: barabash60170@yandex.ru

²Assistant Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: zabelindim1@yandex.ru

The results of a theoretical and practical justification of use of polyvinyl alcohol as film-forming substance for corrosion-protective coatings are presented. Availability of combination of water-soluble contact and vapor phase corrosion inhibitors as a part of a contact polymer composition with sufficient quantity of hydroxyl groups, providing shielding properties of corrosion-protective film, is shown. Use of vapor phase (sodium nitrite) and contact (cyclohexylamine) corrosion inhibitors is proved. Rational correlations of corrosion inhibitors, providing designated periods of products protection in certain environmental conditions, are positioned. For pure polyvinyl alcohol films and for alcohol containing a complex of inhibitors of vari-

ous concentrations, point values of equilibrium sorption, diffusion and water permeability at 20°C are found experimentally. On this basis, the equations of diffusion permeability of the films with varied content of inhibitors of corrosion of different types are derived. It has been found that at augmentation of duration of contact of the film with the modeling medium, which leads to water diffusion into the sample, segmental mobility, free volume of the polymers matrix and, therefore, diffusion permeability of the film for substrate and complex particles increase, which leads to greater activity. The production technology of protecting coatings on the basis of water-soluble polyvinyl alcohol is defined

Key words: corrosion, inhibitor, polyvinyl alcohol, diffusion

References

1. Kunze E., *"Korrosion und Korrosionsschutz"*, Wiley-VCH 3 (2001):1680.
2. Kurshakov A.V., Nefedkin S.I., Ryzhenkov V.A., Kukushkin A.N., *"Definition of parameters of efficacy of film-forming rust inhibitors"* (*"Opredelenye parametrov effektivnosti plenkoobrazuyuzhih ingibitorov korrozii"*), News in the Russian electric power industry 7 (2008): 38-43
3. Vuorinen E., Kalman E., Focke W., *"Introduction to vapor phase corrosion inhibitors in metal packaging"*, Surface Engineering 20 (2000): 281-445.
4. Fillipov G.A., Kukushkin A.N., Mihailov V.A., Velychko E.V., *"Outside preservation of the power equipment with use of film-forming amines"* (*"Naruzhnaya konservatsiya energeticheskogo oborudovaniya s ispolzovaniem plenkoobrazuyuzhih aminov"*), Sheeting's on the basis of synthetic rubbers 3 (2005): 2-4.
5. Trusov V.I., *"Questions of thermodynamics of atmospheric corrosion inhibition"* (*"Voprosy termodinamiki ingibirovaniya atmosferno korrozii"*), Protection of metals 22, 6 (1986): 966-970.
6. Barabash D.E., Zabelin D.A., *"Film corrosion protection as a component of life cycle of equipment"* (*"Plenochhnaya korroziionnaya zashita – sostavnaya chast zhiznennogo tsikla tehniki"*), Voronezh state Technical University, The Interuniversity Scientific Digest, Innovative technologies and the equipment of a machine-building complex 18 (2015): 227-232.
7. Aleshina E. YU., *"Reception and properties of polymeric compositions and film materials on the basis of the polyvinyl alcohol, containing protease C and polygexametylguanidin"* (*"Polucheniye i svoystva polymernykh kompozitsiy i plenochnykh materialov na osnove polyvinilovogo spirta, soderzhaschih proteazy C i polygexametylguanidin"*), Dissertation 02.00.06 M, RSL DD 61:04-2/125-8 (2003): 145
8. Stepin S.N., Sitnov S.A., Tolstocheeva S.I., Miheev S.P., *"Application of polyaniline in the field of anticorrosive protection. (Review)"* (*"Primeneniye polyanilina v oblasti zashity ot korrozii (obzor)"*), Practice of anticorrosive protection 4(74) (2014): 44-56.
9. Suhareva K.V., Andriasyan Yu.O., Mihailov I.A., Popov A.A., *"Protective coatings on the basis of synthetic rubbers"* (*"Zachitnye pokrytiya na osnove synteticheskikh kauchukov"*), Plasts 11-12 (2015): 57-63.
10. State Standard 9.509-89. *"Uniform system of corrosion and ageing protection. Means of temporary anticorrosive protection. Methods of definition of a protective capacity"* (*"Edinaya sistema zashity ot korrozii i stareniya. Sredstva vremennoi protivokorroziionnoi zashity. Metody opredeleniya zashitnoy sposobnosti"*), 1990-01-02, Standards Publishing House (1989): 34
11. Kurshakov A.V., Nefedkin S.I., Ryzhenkov V.A., Kukushkin A.N., *"Definition of parameters of relative efficacy of film-forming rust inhibitors"* (*"Opredeleniye parametrov otnositelnoy effektivnosti plenkoobrazuyuzhih ingibitorov korrozii"*), Water purifying. Water preparation. Water supply 6 (2008): 51-56.
12. Mihailov A.A., Strekalov P.V., *"Modeling of atmospheric corrosion of metals and kinds of dose-answer functions"* (*"Modelirovaniye atmosferno korrozii metallov I vydy funktsiy doza-otvet"*), Corrosion: stuffs, protection 3 (2006): 2-13.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АТОМНОЙ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ МОДЕЛИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Д.Г. Дунаев, А.Т. Косилов, В.В. Ожерельев

В рамках метода молекулярной динамики на основе статистико-геометрического и кластерного анализа выполнено исследование эволюции атомной структуры металлического стекла железа в условиях одноосного сжатия со скоростью $3,3 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$ при постоянной температуре 300 К. Для изучения эволюции ближнего атомного упорядочения в процессе нагружения проведено сопоставление динамики перестройки разных типов координационных многогранников.

Проанализирована динамика уменьшения числа исходных до нагружения координационных многогранников разных типов по мере накопления деформации. Установлено, что в меньшей степени подвержены перестройке многогранники с более высокой плотностью упаковки атомов: (0-0-12-0), (0-1-10-2), (0-0-12-2), (0-3-6-4), (0-2-8-2) и др. Наиболее устойчивыми являются икосаэдры (0-0-12-0). В то же время общее число многогранников любого типа в процессе деформации остается практически неизменным. Таким образом, перестройка атомной структуры стекла носит самосогласованный характер, при этом сохраняется неизменным количественное соотношение между разными типами сопрягающихся между собой координационных многогранников и обеспечивается воспроизводство икосаэдрической субструктурной организации системы в целом.

Проведен анализ взаимных переходов между икосаэдрами (0-0-12-0) и остальными координационными многогранниками. Из всех многогранников, в которые переходят икосаэдры, и наоборот, из которых образуются икосаэдры, наибольшая доля приходится на многогранники (0-1-10-2) и (0-2-8-2)

Ключевые слова: металлическое стекло, деформация, структурная самоорганизация, координационный многогранник, многогранник Вороного, икосаэдр

Введение

Особенности организации атомной структуры металлических стекол (МС) лежат в основе их уникальных физических, в том числе, и механических свойств. Анализ закономерностей взаимного расположения атомов, структурной перестройки в процессе пластического формоизменения этих материалов из-за отсутствия трансляционной симметрии существенно затруднен. В связи с этим для изучения атомных процессов пластической деформации аморфных материалов широко применяются методы атомистического компьютерного моделирования. Основные достижения в изучении пластической деформации, локальных сдвиговых превращений, эволюции полос сдвига методами молекулярной динамики (МД) и Монте-Карло подробно отражены в ряде работ [1-5] и недавних обзорах [6, 7].

Анализ результатов изучения пластического течения МС методом молекулярной динамики, как правило, опирается на представления о разделении структуры стекла на политетраэдрические плотноупакованные области и менее упакованные области с многогранниками Вороного большого объема [6]. Установлено, что локальные пластические сдвиги происходят в рыхлых плохо упакованных областях.

Более детальную картину организации атомной структуры стекла, ее эволюции в процессе деформации получить не удастся в связи с отсутствием базового структурного критерия, позволяющего сформулировать как язык описания самой атомной структуры, так и провести ее идентификацию.

В последние годы методами компьютерного моделирования достигнуты успехи в изучении атомной структуры МС. В работах [8-11] на основе анализа многогранников Вороного и кластерного анализа показано, что определяющая роль в формировании структуры одно- и двухкомпонентных МС принадлежит плотноупакованным нанокластерам, образованным взаимопроникающими икосаэдрами. Изучена структурная организация, морфология нанокластеров, их распределение по размерам. Атомы, которые не принадлежат икосаэдрам, образуют структуру менее плотную, более склонную к перестройке в поле внешних приложенных напряжений.

Дальнейший прогресс в раскрытии закономерностей эволюции атомной структуры в процессе деформации МС может дать подход, основанный на анализе всех типов координационных многогранников (КМ) системы, их сопряжении и взаимных перестройках в процессе роста нагрузки. В настоящей работе методом молекулярной динамики проведен анализ эволюции нанокластерной структуры модели МС железа в процессе одноосной деформации сжатием, установлены закономерности сопряжения и перестройки координационных многогранников в процессе накопления деформации. Показано, что все локальные атомные перестройки в процессе деформации подчинены требованию сохранения икосаэдрической нанокластерной субструктуры МС.

Дунаев Дмитрий Геннадьевич – ВГТУ, соискатель, e-mail: dimadunaev@yandex.ru

Косилов Александр Тимофеевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: kosilovat@mail.ru

Ожерельев Виктор Вадимович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ozher@mail.ru

Методика моделирования

Модель МС железа была получена методом молекулярной динамики путем закалки из расплава. Она содержала 102400 атомов, размещенных в основной ячейке размерами $73 \times 73 \times 211 \text{ \AA}$ по осям x , y и z соответственно, с периодическими граничными условиями в направлении оси z . Численное интегрирование уравнений движения осуществлялось с временным шагом $\Delta t = 1.5 \times 10^{-15} \text{ с}$ по алгоритму Верле в скоростной форме. Взаимодействие между атомами железа рассчитывалось с использованием парного потенциала Пака-Доямы [12].

Для получения модели МС железа была выполнена мгновенная закалка расплава от температуры 2300 К до 1000 К и выдержка при этой температуре в течение 3000 временных шагов, после чего температурное ограничение было снято и в системе на протяжении 80000 временных шагов при постоянной внутренней энергии устанавливалось тепловое равновесие. Затем аналогичным образом температура была снижена до 300 К.

Одноосное сжатие полученной модели МС со скоростью $3,3 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ осуществлялось циклически, каждый этап включал в себя деформацию модели вдоль оси z на величину 0.0005 и последующую выдержку в течение 1000 Δt с поддержанием постоянной температуры 300 К.

Величина напряжения сжатия рассчитывалась путем усреднения локальных атомных напряжений [13]. Для изучения эволюции атомной структуры МС железа в процессе деформации проводился статистико-геометрический и кластерный анализ с использованием многогранников Вороного.

Результаты и их обсуждение

Деформационная кривая в процессе сжатия модели и последующей разгрузки приведена на рис. 1. Рассчитанная величина эффективного модуля упругости по наклону деформационной кривой на начальной стадии нагружения составила 38 ГПа, при последующей разгрузке - 47 ГПа. Более низкая величина модуля упругости, полученная в процессе нагружения модели, связана со стимулированной внешним напряжением направленной структурной релаксацией [14]. Для выяснения характера атомных перестроек модели железа в процессе деформации был проведен статико-геометрический анализ на основе построения многогранников Вороного (МВ). Напомним, что в обозначении (n_3 - n_4 - n_5 - n_6 -...) МВ n означает число граней, имеющих соответственно 3, 4, 5, 6 ... ребер, или для соответствующих КМ n означает число атомов в вершинах, имеющих 3, 4, 5, 6 ... таких же ближайших соседей. Известно [15], что искажения координационных многогранников в структуре МС часто приводят к ошибочной идентификации МВ из-за появления малых по площади дополнительных граней. Эти грани образованы атомами, не имеющими непосредственного контакта с центральным атомом, они лишь частично внедрены

между атомами первой координационной сферы. Их удаление позволяет приблизиться к более адекватной картине распределения КМ по их типам.

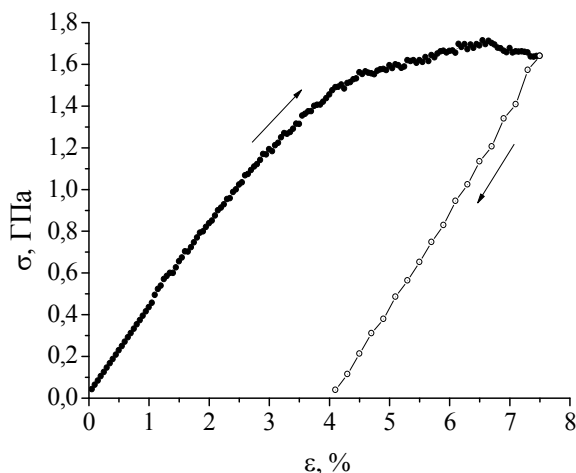


Рис. 1. Зависимость напряжения сжатия модели аморфного железа от величины деформации в процессе нагружения с постоянной скоростью $3,3 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$ и последующей разгрузки

Распределение граней МВ по их площадям для модели стекла железа показано на рис. 2. Если основной максимум на кривой распределения сформирован атомами, непосредственно контактирующими с центральным атомом многогранника, то за резкий рост числа малых по размеру граней с уменьшением их площади ответственны более удаленные атомы. В работе для верхней границы площади отбрасываемых граней была выбрана величина $0,5 \text{ \AA}^2$, отвечающая минимуму на кривой распределения (пунктирная линия на рис. 2).

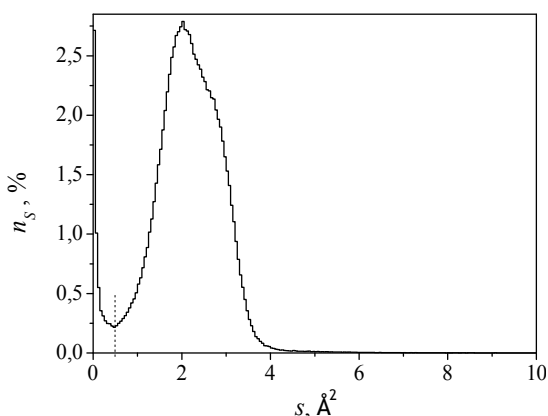


Рис. 2. Распределение граней МВ по их площадям в модели МС железа

На рис. 3 представлены относительные доли основных МВ в исходной до деформации модели с учетом всех граней и после удаления малых по размеру граней. В результате удаления малых по размеру граней существенно возросло число наиболее плотноупакованных многогранников типа (0-1-10-2), (0-0-12-0), (0-3-6-4), (0-2-8-2) и (0-0-12-2); их общая доля превысила 60% от общего числа МВ.

Деформация, как результат взаимных смещений атомов в локальных центрах МС, сопровождается изменением ближнего порядка. В результате такой перестройки изменяются и типы КМ. Однако уменьшение числа КМ определенного типа в результате их перестройки частично или полностью компенсируется за счет других типов КМ, которые перестроились в процессе деформации в данный тип. Этот процесс носит самосогласованный характер. Для изучения эволюции ближнего атомного упорядочения в процессе нагружения проведено сопоставление динамики перестройки разных типов КМ без учета и с учетом их пополнения.

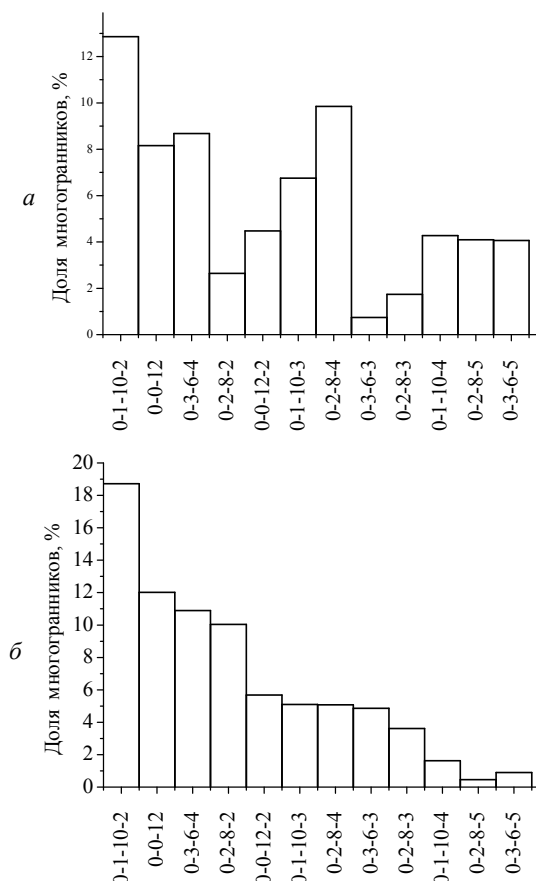


Рис. 3. Доли многогранников Вороного (в процентах) наиболее часто встречающихся типов без удаления малых граней (а) и после удаления (б)

Динамика уменьшения числа исходных до нагружения КМ разного типа по мере накопления деформации проиллюстрирована на рис. 4. В исходной модели за 100% принято число КМ данного типа при $\varepsilon = 0$. С ростом деформации число КМ разного типа, в центрах которых оставались те же атомы, что и в исходной модели, уменьшается. Как следует из полученных зависимостей, в меньшей степени подвержены перестройке КМ с более высокой плотностью упаковки атомов: (0-0-12-0), (0-1-10-2), (0-0-12-2), (0-3-6-4), (0-2-8-2) и др. Наиболее устойчивыми оказались икосаэдры (0-0-12-0) – лишь 56% из них при достижении $\varepsilon = 0,075$ перестроились в другие типы КМ. Перестройка остальных типов КМ, как это показано на рис. 4, происходит в

значительно большей степени. Практически полностью обновляются КМ с большими индексами, такие как (0-2-8-5), (0-3-6-5) и др.

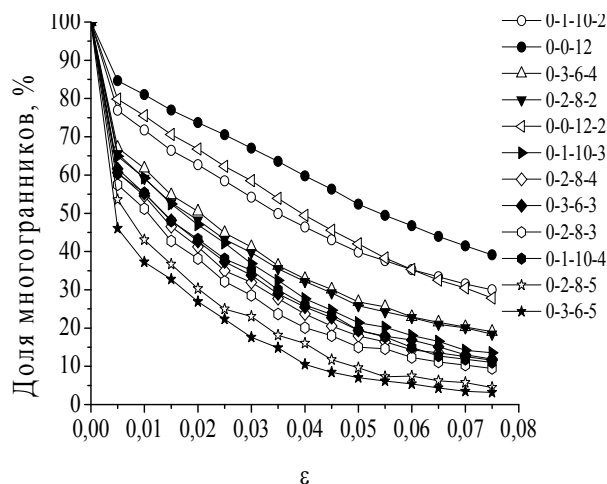


Рис. 4. Изменение доли исходных до деформации КМ разных типов в процессе деформации

С целью установления влияния степени деформации на перераспределение КМ между разными типами были построены зависимости общего числа МВ разного типа от степени деформации. Результаты, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что число КМ любого типа в процессе деформации практически остается неизменным. Наблюдается лишь незначительное (~0,5%) уменьшение КМ (0-3-6-4) и увеличение – (0-0-12-0). Перестройка структуры происходит самосогласованно, подчиняясь каким-то внутренним правилам этого процесса, обеспечивающим с ростом деформации практически неизменное количество многогранников разного типа.

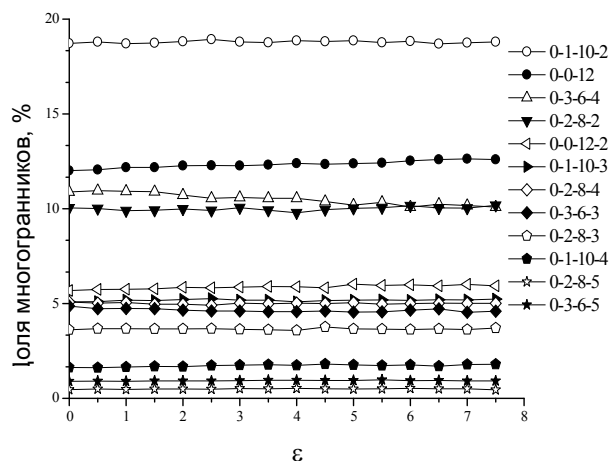


Рис. 5. Изменение числа основных типов МВ в процессе деформации

Из большого числа вариантов перестроек одних типов КМ в другие в работе проведен анализ взаимных переходов между наиболее плотноупакованными икосаэдрами (0-0-12-0) и всеми остальными координационными многогранниками.

На рис. 6а показаны типы КМ, в которые перестроились икосаэдры на каждом шаге деформации, и их доли от общего числа икосаэдров. График восстановления утраченных икосаэдров за счет других типов приведен на рис. 6б. Общее число икосаэдров, перестроившихся в другие типы КМ на каждом шаге, колеблется в пределах 1800-2700, незначительно увеличиваясь с ростом деформации. Из всех многогранников, в которые переходят икосаэдры, и, наоборот, из которых образуются икосаэдры, наибольшая доля приходится на КМ (0-1-10-2) ($\approx 6,5\%$) и (0-2-8-2) ($\approx 5,5\%$).

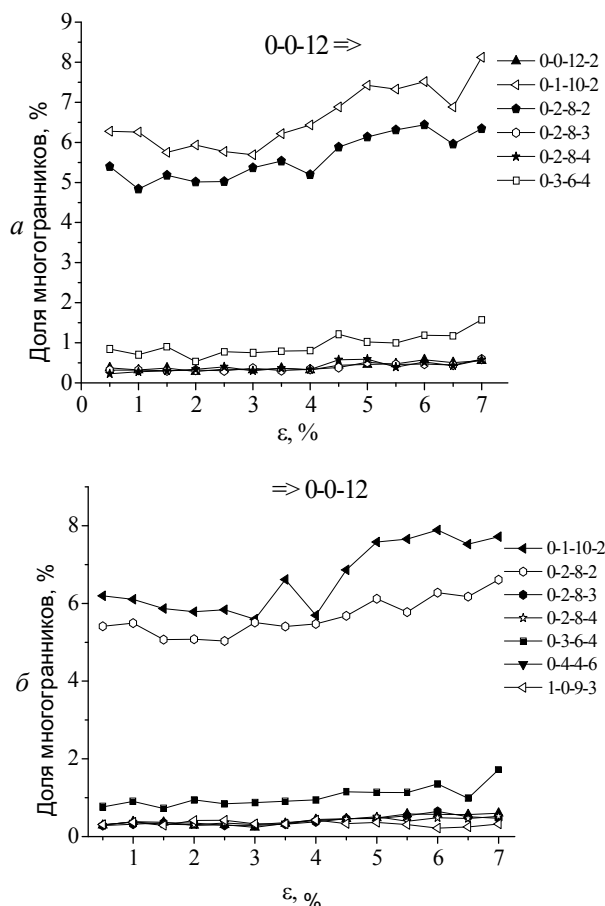


Рис. 6. Доля икосаэдров (в % от их общего числа), которые на каждом шаге деформации: а) перестроились в другие типы многогранников, б) образовались из других типов многогранников

Из общего числа атомов системы 64 % расположены в вершинах икосаэдров. КМ этих атомов образуют взаимопроникающие связи с икосаэдрами, при этом примерно треть из них приходится на КМ (0-1-10-2) и (0-2-8-2) (см. рис. 7). Столь высокая концентрация взаимопроникающих с икосаэдрами указанных двух типов многогранников является результатом политетраэдрической упаковки атомов в процессе стеклования и неизбежного при этом процесса сброса накапливаемых несоответствий по мере роста объема икосаэдрических нанокластеров.

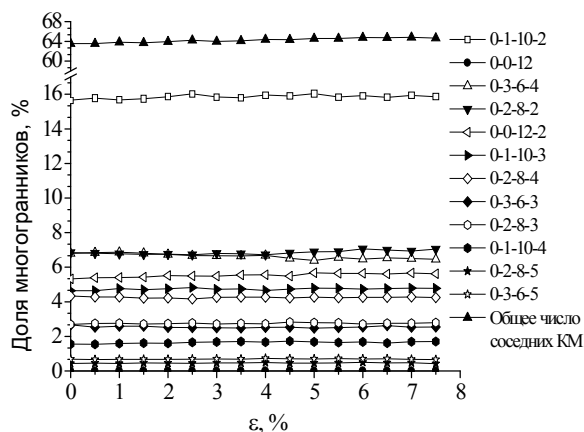


Рис. 7. Изменение числа основных типов МВ, находящихся в окружении икосаэдров металлического стекла Fe в процессе деформации

Перестройка атомов, находящихся в вершинах икосаэдров, по указанным схемам (0-0-12-0) $\leftrightarrow$ (0-1-10-2) и (0-0-12-0) $\leftrightarrow$ (0-2-8-2) показана на рис. 8. Она сводится к взаимному смещению атомов двух смежных треугольных граней икосаэдра, до образования или октаэдра за счет внедрения дополнительного атома в квадратную лунку (рис. 8а), или искаженного полукосаэдра без внедрения дополнительного атома (рис. 8б). Восстановление числа икосаэдров происходит в других местах нанокластера за счет таких же типов тех же КМ (0-1-10-2) и (0-2-8-2) путем смещения показанных на рис. 8 атомов в противоположные направления. Такая перестройка изменяет морфологию нанокластера, но остается неизменной его икосаэдрическая ориентационная симметрия.

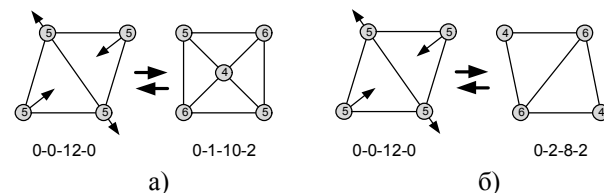


Рис. 8. Схематичное изображение фрагмента структуры атомов, расположенных в вершинах икосаэдра, и их перегруппировка с образованием новых типов КМ; пунктирными стрелками показаны направления смещения атомов; цифрами показано число ближайших соседей, расположенных в вершинах КМ; атом в центре прямоугольника не принадлежал исходному икосаэдру

На рис. 9 показана структурная эволюция одного из икосаэдрических нанокластеров модели в процессе накопления деформации до 1 %. Атомы, находящиеся в центрах икосаэдров, изображены темными сферами, а атомы, которые перестроились из МВ (0-0-12) в другие типы или перейдут в МВ (0-0-12) в процессе деформации, изображены светлыми сферами. Связи между центрами взаимопроникающих икосаэдров показаны жирными сплошными линиями, связи между атомами, которые в исходном кластере ($\varepsilon = 0\%$) находились в центрах взаимопроникающих икосаэдров - пунктирными линиями. Тонкими линиями обозначены связи между теми

атомами, которые в исходной структуре находились в вершинах икосаэдров.

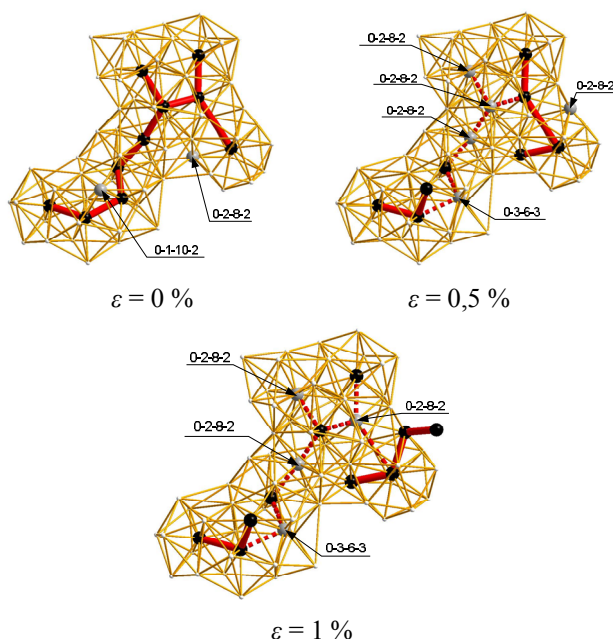


Рис. 9. Эволюция политетраэдрического нанокластера в процессе деформации

Таким образом, в процессе деформации малые по величине самосогласованные процессы взаимных смещений атомов приводят к изменению типов КМ, морфологии нанокластеров, при этом количество КМ каждого типа остается неизменным. Наблюдаемая закономерность, очевидно, является результатом устойчивой тенденции системы в процессе перестройки структуры к сохранению икосаэдрических локальных центров в объеме стекла, которые включают изолированные икосаэдры и кластеры из взаимнопроникающих икосаэдров.

Выводы

1. В процессе деформации сжатием модели металлического стекла железа самосогласованная перестройка координационных многогранников происходит таким образом, что число исходных до деформации атомов, находящихся в центрах каждого типа многогранника, обновляется более чем на 50%, в то время как общее их число для каждого типа с ростом деформации остается практически неизменным.

2. Изолированные икосаэдры и нанокластеры, образованные взаимнопроникающими икосаэдрами, перестраиваются преимущественно в КМ (0-1-10-2) и (0-2-8-2), в основном за счет таких же типов КМ происходит и восстановление общего числа икосаэдров.

3. Сохранение количественного соотношения между разными типами КМ, воспроизводство политетраэдрической нанокластерной структуры и ее ближайшего окружения в процессе деформации МС

железа свидетельствует о высокой степени устойчивости икосаэдрического ориентационного порядка, как доминирующего фактора в организации атомной структуры металлического стекла и ее стабилизации.

Литература

1. Falk M. L. Simulating the mechanical response of amorphous solids using atomistic methods / M. L. Falk, C. E. Maloney // *Eur. Phys. J. B.* – 2010. – Vol. 75. – P. 405 – 413.
2. Cao A.J. Structural processes that initiate shear localization in metallic glass/ A.J. Cao, Y.Q. Cheng, E. Ma // *Acta Materialia*. – 2009. – Vol. 57. – No. 17. – P. 5146 – 5155.
3. Shimizu F. Theory of Shear Banding in Metallic Glasses and Molecular Dynamics Calculations / F. Shimizu, S. Ogata, J. Li // *Materials Transactions*. – 2007. – Vol. 48. – No. 11. – P. 2923 – 2927.
4. Relationship between local geometrical factors and mechanical properties for Cu–Zr amorphous alloys / M. Wakeda, Y. Shibutani, S. Ogata et al. // *Intermetallics*. – 2007. – Vol. 15. – No. 2. – P. 139 – 144.
5. Shi Y. Atomic-scale simulations of strain localization in three-dimensional model amorphous solids / Y. Shi, M. L. Falk // *Phys. Rev. B*. – 2006. – Vol. 73. – No. 21. – P. 214201 [10 pages].
6. Takeuchi S. Atomistic simulation and modeling of localized shear deformation in metallic glass / S. Takeuchi, K. Edagawa // *Progress in Materials Science*. – 2011. – Vol. 56. – No. 6. – P. 785 – 816.
7. Egami T. Mechanical Properties of Metallic Glasses / T. Egami, T. Iwashita, W. Dmowski // *Metals*. – 2013. – Vol. 3. – No. 1. – P. 77 – 113.
8. Евтеев А.В. Структурная модель стеклования чистых металлов / А. В. Евтеев, А. Т. Косилов, Е. В. Левченко // *Письма в ЖЭТФ*. – 2002. – Т. 76. – № 2. – С. 115 – 117.
9. Евтеев А. В. Атомные механизмы стеклования чистого железа / А. В. Евтеев, А. Т. Косилов, Е. В. Левченко // *ЖЭТФ* – 2004. – Т. 126. – № 3. – С. 600 – 608.
10. Кластерная модель структурной организации аморфного железа / Е. В. Левченко, А. В. Евтеев, С. Ю. Вахмин и др. // *ФММ*. – 2010. – Т. 9. – № 6. – С. 603 – 607.
11. Молекулярно-динамическое изучение процесса стеклования бинарного сплава Ni₆₀Ag₄₀ / А.Ю. Прядыльщиков, А.Т. Косилов, А.В. Евтеев и др. // *ЖЭТФ*. – 2007. – Т. 132. – № 6. – С. 1352 – 1358.
12. Torrens I. M. Interatomic potentials / I. M. Torrens. – New York: Academic Press, 1972.
13. Egami T. Atomic level stresses / T. Egami // *Progress in Materials Science*. – 2011. – Vol. 56. – No. 6. – P. 637 – 653.
14. Косилов А. Т. Направленная структурная релаксация и гомогенное течение сверхзакаленных металлических стекол / А. Т. Косилов, В. А. Хоник // *Изв. РАН, сер. физ.* – 1993. – Т. 57 – С. 192 – 198.
15. Медведев Н. Н. Метод Вороного-Делоне в исследовании структуры некристаллических систем / Н. Н. Медведев. – Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000. – 214 с.

LAWS OF ATOMIC STRUCTURAL SELF-ORGANIZATION OF THE IRON METALLIC GLASS MODEL UNDER CONDITIONS OF UNIAXIAL LOADING

D.G. Dunaev¹, A.T. Kosilov², V.V. Ozherelyev³

¹Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: dimadunaev@yandex.ru

²Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: kosilovat@mail.ru

³PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation
e-mail: ozher@mail.ru

The study of evolution of metallic glass atomic structure under uniaxial pressure at the speed of $3,3 \times 10^8 \text{ c}^{-1}$ and constant temperature of 300K is carried out in the frame of the molecular dynamics method on the basis of statistical-geometry and cluster analysis. The comparison of transformational dynamics of different types of coordination polyhedrons is carried out to examine the evolution of near atomic ordering during loading.

The dynamics of the decrease in the number of the source before loading coordination polyhedra of different types as the deformation is accumulated is analyzed. It is established that polyhedrons with a higher atomic packing density are less susceptible to rearrangement: (0-0-12-0), (0-1-10-2), (0-0-12-2), (0-3-6-4), (0-2-8-2), etc. The most stable are icosahedra (0-0-12-0). At the same time, the total number of polyhedra of any type during deformation remains practically unchanged. Thus, the restructuring of the atomic structure of glass is self-consistent, while the quantitative ratio between different types of interfacing coordinating polyhedra remains unchanged, and the reproduction of the icosahedral sub-structural organization of the system as a whole is ensured.

The analysis of mutual transitions between icosahedra (0-0-12-0) and other coordination polyhedrons is carried out. The largest part of all the polyhedra into which the icosahedra transform, and vice versa, from which icosahedra form, is polyhedra (0-1-10-2) and (0-2-8-2)

Key words: metallic glass, deformation, structural self-organization, coordination polyhedron, Voronoi polyhedron, icosahedron

References

1. Falk M. L., Maloney C. E., "Simulating the mechanical response of amorphous solids using atomistic methods", Eur. Phys. J. B 75 (2010): 405 – 413.
2. Cao A.J., Cheng Y.Q., Ma E., "Structural processes that initiate shear localization in metallic glass", Acta Materialia 57 #17 (2009): 5146 – 5155.
3. Shimizu F., Ogata S., Li J., "Theory of Shear Banding in Metallic Glasses and Molecular Dynamics Calculations", Materials Transactions 48 (2007): 2923 – 2927.
4. Wakeda M., Shibutani Y., Ogata S., Park J., "Relationship between local geometrical factors and mechanical properties for Cu–Zr amorphous alloys", Intermetallics 15 #2 (2007): 139 – 144.
5. Shi Y., Falk M. L., "Atomic-scale simulations of strain localization in three-dimensional model amorphous solids", Phys. Rev. B. 73 #21 (2006): 214201 [10 pages].
6. Takeuchi S., Edagawa K., "Atomistic simulation and modeling of localized shear deformation in metallic glass" Progress in Materials Science 56 #6 (2011): 785 – 816.
7. Egami T., Iwashita T., Dmowski W., "Mechanical Properties of Metallic Glasses", Metals 3 #1 (2013): 77 – 113.
8. Evteev A. V., Kosilov A. T., Levchenko E. V., "Structural model for vitrification of pure metals" ("Strukturnaya model' steklovaniya chistyh metallov"), Journal of theoretical and experimental physics (Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki) 76 #2 (2002): 115 – 117.
9. Evteev A. V., Kosilov A. T., Levchenko E. V., "Atomic mechanisms of pure iron vitrification" ("Atomnye mekhanizmy steklovaniya chistogo zheleza"), Journal of theoretical and experimental physics (Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki) 126 #3 (2004): 600 – 608.
10. Levchenko E. V., Evteev A. V., Vakhmin S. Yu., Kosilov A. T., Pryadilshchikov A. Yu., "Cluster model of structural organization of amorphous iron" ("Klasternaya model' strukturnoj organizatsii amorfno go zheleza"), Physical metallurgy (Fizika metallov i metallovedenie) 9 #6 (2010): 603 – 607.
11. Pryadilshchikov A. Yu., Kosilov A. T., Evteev A. V., Levchenko E. V., "Molecular-dynamics study of the Ni₆₀Ag₄₀ binary alloy glass transition" ("Molekulyarno-dinamicheskoe izuchenie processa steklovaniya binarnogo splava Ni₆₀Ag₄₀"), Journal of theoretical and experimental physics (Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki) 136 #6 (2007): 1352 – 1358.
12. Torrens I. M. "Interatomic potentials", New York: Academic Press (1972)
13. Egami T., "Atomic level stresses", Progress in Materials Science 56 #6 (2011): 637 – 653.
14. Kosilov A. T., Khonik V. A., "Directional structural relaxation and homogeneous flow of overhardened metallic glasses" ("Napravlenaya strukturnaya relaksatsiya i homogennoe techenie sverhzakalennykh metallicheskih stekol"), News of Russian Academy of Science (Izvestiya Rossijskoj akademii nauk, seriya fizicheskaya) 57 (1993): 192 – 198.
15. Medvedev N. N., "Voronoi-Delaunay method in studying the structure of non-crystalline systems" ("Metod Voronogo-Delone v issledovanii struktury nekristallicheskih system"), Scientific Publishing Center of United University of Geology, Geophysics and Minerals of Siberian Division of Russian Academy of Science (2000): 214