

СОДЕРЖАНИЕ

Физика

Влияние механического воздействия в процессе осаждения на состав и структуру толстослойных электрогальваномеханических покрытий железа О.В. Горожанкина	4
Механические свойства модифицированных одностенными углеродными нанотрубками эпоксидных связующих для армированных композиционных материалов Е.С. Афанасьева, А.В. Бабкин, А.В. Солопченко, А.В. Кепман, Э.М. Эрдни-Горяев, А.М. Кудрин	10
Электрические, диэлектрические и магнитные свойства наноструктурированного титаната бария В.М. Аль Мандалави, Т.Н. Короткова, А.И. Дунаев, М.А. Каширин, А.В. Калгин, Н.А. Емельянов, Л.Н. Коротков	19

Информатика, вычислительная техника

и управление

Моделирование вычислительных сетей с применением CASE-средств М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева	28
Модели и алгоритмы графической визуализации инженерных задач на UNIX-подобных операционных системах А.Д. Данилов, В.А. Минеев	32
Модель функциональных отказов пилотажно-навигационного комплекса вертолета С.В. Васильев, В.А. Демчук, В.И. Рубинов, В.А. Малышев, А.А. Гарасов	37
Алгоритмизация решения задачи о размещении на основе модификации метода ветвей и границ Д.Э. Елизаров	42
Прогнозирование динамики потенциально опасных процессов на основе нейросетевого моделирования Э.Э. Чигбу, К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский	49
Применение системы аварийной защиты и управления для обеспечения контроля качества двигателей 14Д23 И РД0124А С.М. Пасмурнов, Д.Ю. Якуш	54
Интеллектуализация управления гибким автоматизированным производством А.Д. Данилов, В.А. Ломакин	60

Энергетика

Моделирование динамических характеристик адаптивной электромеханической системы с бесконтактным двигателем постоянного тока С.А. Винокуров	65
--	----

Радиотехника и связь

Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, С.Ю. Белецкая	70
--	----

Разработка 10-битного маломощного АЦП последовательного приближения в САПР Cadence	
А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев.....	74
Двухканальная комбинационная самосинхронная схема с восстановлением	
С.Ф. Тюрин.....	77
Реализации LDPC-декодера низкой сложности с использованием алгоритма min-sum	
А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, В.И. Борисов.....	82
Плоские антенны вытекающей волны СВЧ и КВЧ с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности	
В.В. Верейтин, Д.А. Ерошенко, Н.А. Ивочкин, А.И. Климов,	
К.А. Разинкин.....	87
<i>Машиностроение и машиноведение</i>	
Разработка принципов создания имитационных моделей на основе событий технологических процессов	
П.Ю. Гусев, Ю.С. Скрипченко.....	92

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ОСАЖДЕНИЯ НА СОСТАВ И СТРУКТУРУ ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ЭЛЕКТРОГАЛЬВАНОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЖЕЛЕЗА

О.В. Горожанкина

Технологии электрогальваномеханического железнения являются перспективным направлением восстановления размеров при ремонте изношенных крупногабаритных валов. При использовании данных технологий можно будет восстанавливать до 60 - 70 % крупногабаритных деталей, не имеющих разрушений.

Для нанесения покрытий с оптимальными функциональными характеристиками необходимо иметь четкие и как можно более полные представления об их составе и структуре, которые являются связующим звеном между задаваемыми условиями осаждения и свойствами получаемых покрытий.

В данной статье впервые описано влияние механического воздействия инструмента в процессе осаждения на состав и структуру получаемых толстослойных (1,5 – 1,8 мм) покрытий железа, что дает возможность выбора оптимальных режимов нанесения электрогальваномеханических (ЭГМ) покрытий и прогнозирования работы деталей с ЭГМ покрытиями.

В качестве объектов исследования выбраны толстослойные покрытия на образцах из стали 30, полученные методом электрогальванического (ЭГ) и ЭГМ железнения, при совместном осаждении и механической активации осаждаемого слоя.

Результаты исследований показали, что толстослойное ЭГМ покрытие содержит значительно ниже допустимых значений величину вредных примесей (водород - 0,0043%, сера - 0,0021%). Использование выглаживающего инструмента уменьшает содержание окислов и вредных примесей (в том числе водорода), что позволяет получать плотные однородные железные покрытия повышенной толщины (1,5 – 1,8 мм). Внутренняя структура ЭГМ покрытия состоит из ультрамелкодисперсных зерен размером $\sim 10^{-6}$ - 10^{-7} мм. Это меньше размеров зерен в электрогальванических ЭГ покрытиях ($\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} мм) и гораздо меньше размеров зерна металлургического железа ($\sim 10^{-3}$ мм). Установлено, что применение механического воздействия устраняет слоистость и делает структуру покрытия более равномерной, плотной, мелкодисперсной и уменьшает густоту сетки трещин, которая больше у ЭГ покрытия без механического воздействия

Ключевые слова: электрогальваномеханическое железнение, толстослойное покрытие, механические свойства, структура

В машиностроении изготавливается большая номенклатура крупногабаритных валов (диаметром 200-500 мм, длиной до 3000-5000 мм и более), работающих на износ и усталостную прочность: валы мощных судовых и локомотивных дизелей, прокатных станков, бумагоделательных и других машин. Их эффективное использование обеспечивается высоким уровнем технического обслуживания и ремонта, а также наличием необходимого числа запасных частей. До 70 % изношенных дорогостоящих валов можно было бы повторно использовать, восстанавливая слой толщиной 0,9-1,2 мм, и имеющий прочность сцепления не менее 200-250 МПа.

В мировой практике выполняется восстановление крупногабаритных дорогостоящих изношенных деталей судовых и тепловозных мощных дизелей с остаточным ресурсом по усталостной прочности методами напыления, наплавкой, термопластическим деформированием, гальваническим

осаждением. Однако данные методы либо не обеспечивают нужную толщину восстановленного слоя, либо приводят к недопустимому короблению и трудно устранимой поводке деталей. Поэтому, при достаточно большом количестве способов восстановления работоспособности коленчатых валов, актуальной задачей до сих пор является поиск новых эффективных технологий ремонта, обеспечивающих восстановление их рабочих поверхностей и повышение эксплуатационного ресурса [1].

Вневанный способ восстановления электрогальваническим железнением в проточном электролите с механическим воздействием выглаживающим инструментом в процессе осаждения, реализуется при небольших температурах (40 – 50 °С). Это предотвращает коробление и поводку деталей, обеспечивает требуемую толщину (1,5 – 1,8 мм), микротвёрдость (600 - 650 HV) и низкую шероховатость ($R_a = 0,63 - 1,25$ мкм), обуславливающую малый припуск на шлифование восстановленного слоя. Метод имеет невысокие материальные и

энергетические затраты и быструю окупаемость за счет применения экологически приемлемого недорогого электролита хлористого железа.

Сущность метода состоит в одновременном сочетании электрохимического осаждения покрытий и механического активирования рабочей поверхности деталей. В этом случае создаются условия для получения покрытий с высокой прочностью сцепления между основным металлом и осадком большой толщины (порядка 2,0 мм) при значительных плотностях тока (на порядок больше, чем при традиционных способах осаждения).

Отличительной особенностью данного способа является то, что в процессе электролиза покрываемая поверхность подвергается механическому активированию (выглаживанию) инструментом в виде бруска из минералокерамики с полированной поверхностью, который перемещается в межэлектродном пространстве. Этот процесс получил название "гальваномеханическое осаждение металла" [2], а применительно к данной технологии – электрогальваномеханическое железнение (ЭГМЖ).

В данной статье впервые описано влияние механического воздействия инструмента в процессе осаждения на состав и структуру получаемых толстослойных покрытий железа, что дает возможность выбора оптимальных режимов нанесения электрогальваномеханических (ЭГМ) покрытий и прогнозирования работы деталей с ЭГМ покрытиями.

В качестве объектов исследования выбраны толстослойные покрытия на образцах из стали 30, полученные методом электрогальванического (ЭГ) и ЭГМ железнения, при совместном осаждении и механической активации осаждаемого слоя.

Процесс осаждения осуществляли в хлористом электролите следующей рецептуры: железо хлористое четырехводное $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ – 350 кг/м³; регулятор кислотности до уровня $pH = 1$ – кислота соляная HCl. ЭГМЖ осуществляли согласно технологическим рекомендациям на специальной установке [3].

В качестве инструментов для механического воздействия применяли пластины из минералокерамики.

Использовали режим осаждения с механической активацией и без механической активации; получили две детали с покрытием. Затем от каждой детали был отрезан образец

размерами примерно 22x22x3 мм и в дальнейшем исследовался (рис. 1).

Химический состав ЭГМ покрытия и основного металла определялся кулонометрическим методом при помощи экспресс-анализаторов. При этом определяли процент содержания углерода, водорода и серы. Результаты указаны в таблице.



Рис. 1. Фрагменты шлиф-образцов для исследований, вырезанные из цилиндрических макетов деталей

Электрогальваномеханическое железнение (ЭГМЖ)		
Химический элемент	Содержание, %	
	основа, сталь 30	покрытие
Углерод (С)	0,223	0,086
Водород (Н)	0,0042	0,0043
Сера (S)	0,0088	0,0021

Содержание углерода в покрытии составляет 0,086%, что соответствует содержанию углерода в стали 08 (дозвтектоидная малоуглеродистая сталь), полученной металлургическим путем.

Содержание водорода в ЭГМ покрытии крайне мало (0,004 – 0,005%), что соответствует приблизительно количеству водорода (0,0042%) в основном материале (сталь 30), полученном металлургическим путем. Это можно объяснить тем, что адсорбированные водородные атомы с поверхности осаждаемого покрытия систематически и достаточно быстро удаляются выглаживающим инструментом, поэтому можно предположить, что такое низкое содержание водорода в получившемся покрытии зависит именно от этого. В ЭГ покрытиях без механического воздействия содержание водорода по данным [4] больше, и составляет 0,0098 – 0,01%, что повышает хрупкость.

Количество серы в четыре раза меньше, чем в основном металле.

Состав поверхностного слоя изучаемого покрытия исследовался методом энергодисперсионного анализа на растровом электронном микроскопе серии EVO. Согласно данным анализа, поверхностные слои изучаемого железного покрытия обогащены различными примесными элементами, в частности неметаллическим элементом хлором, так как в процессе электроосаждения железа из раствора хлористого железа, участвует не только базовый компонент, но и элементы неметаллической природы (такие, как водород, хлор и другие). Наибольшая концентрация содержания хлора в покрытии наблюдается вдоль поверхностных трещин (рис. 2).

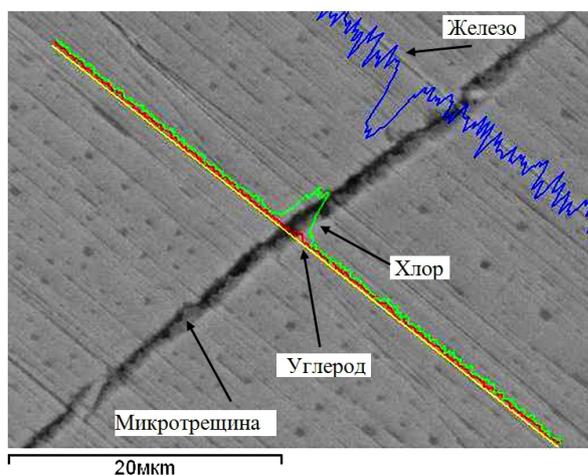


Рис. 2. Наружная поверхность ЭГМ покрытия. Линиями показаны зона сканирования при рентгеноспектральном микроанализе и расположение элементов в покрытии: железо, хлор, углерод

Здесь содержание хлора в покрытии приближенно достигает 2-4 %.

Это связано с тем, что, как правило, атомы любых примесных элементов скапливаются в местах с микродефектами структуры, например на границах зерен. В свою очередь границы зерен и включения служат непреодолимым препятствием для движения дислокаций (линейных дефектов структуры). При большом скоплении дислокаций эти зоны становятся неспособными к пластическому деформированию и при увеличении напряжений в этих местах возможно образование микротрещин.

Рентгеноспектральным микроанализом образца установлено, что пики содержания железа и хлора находятся в противофазе: в области микротрещины количество хлора максимально (пик хлора на рис. 2), а количество железа минимально. Углерод

расположен практически равномерно, с незначительным увеличением в районе пика хлора. То есть поверхностные и внутренние трещины в покрытии обогащаются хлором и обедняются железом.

Предполагается, что механическое воздействие инструмента при осаждении снижает неоднородность распределения хлора и железа, так как инструмент систематически удаляет образующиеся гидроокиси хлора, и в связи с этим в ЭГМ покрытии железа неоднородность распределения этих элементов меньше, чем в ЭГ покрытии. В случае ЭГ покрытия без механического воздействия неоднородность будет более сильная, так как гидроокиси хлора не удаляются и накапливаются в области поверхностных дефектов в большем количестве.

Исследование внутренней структуры (микроструктуры) в сечении толстослойного ЭГМ и ЭГ покрытий проводилось методом световой микроскопии с помощью металлографического оптического микроскопа Альтами MET 1С.

В общем случае электрогальванических покрытий, полученных в хлористых, сульфатных и других электролитах железа, наблюдается ярко выраженная слоистость структуры, обусловленная включением гидроокисей рН гидратообразования, особенно при наличии трехвалентного железа. Слоистая структура электролитических сплавов возникает вследствие чередующегося обеднения прикатодного слоя ионами более электроположительного компонента, в результате чего достигается потенциал выделения более электроотрицательного компонента с одновременным диффузионным выравниванием концентрации ионов металла.

С ростом плотности тока, вследствие усиления адсорбции органических соединений и концентрационных ограничений по ионам металлов на катоде периодически формируются слои с большим содержанием гидроокисей. На их поверхности образуются слои поликристаллов с металлической структурой и значительно меньшим содержанием гидроокисей. Наличие слоистости негативно сказывается в процессе эксплуатации электролитических покрытий, так как изменения структуры по толщине ухудшают некоторые характеристики осадков, в частности, защитные.

Результаты исследования покрытий на оптическом микроскопе Альтами MET 1С подтверждают наличие слоистости ЭГ покрытий без механического воздействия (рис.

3 а). При исследовании ЭГМ толстослойных железных покрытий слоистость не обнаруживается (рис. 3 б). Это объясняется, по мнению автора, тем, что выглаживающий инструмент периодически и интенсивно воздействует на образующиеся кристаллы покрытия, способствует перемешиванию электролита у катода, а также частичному очищению прикатодного слоя от гидроокисей, что устраняет периодичность образования слоев с включениями гидроокисей. Применение механического воздействия выглаживающим инструментом приводит к формированию более плотной и равномерной структуры ЭГМ покрытия.

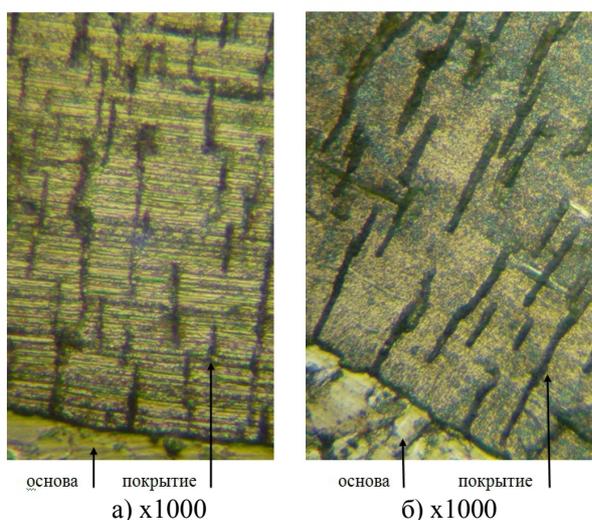


Рис. 3. Микроструктура покрытия на микрошлифе а) - ЭГ железнение без механического воздействия; б) - ЭГМ железнение с механическим воздействием

Полученные ЭГМ и ЭГ железнением толстослойные покрытия имеют трещины (или поры) как связанные, так и не связанные между собой. В общем случае гальванических процессов характер трещиноватости зависит, главным образом, от структурных особенностей осадков, а также от наличия в них неметаллических включений (частиц гидроокисей, хлора, поверхностно-активных веществ, продуктов их распада). Также при соосаждении с металлом примесных веществ трещины обычно возникают в местах скопления включений. Последние располагаются преимущественно по границам зерен. Это приводит к ослаблению связи между зернами и к интеркристаллитному растрескиванию осадка [5].

Включение в покрытия ПАВ и гидроокисей осаждаемых металлов, вызывает развитие слоистой структуры осадков и появление в них

продольных и волосовидных трещин. При разложении гидридных фаз, например гидрида никеля с ГЦК решеткой, возможно даже появление микротрещин спирального характера.

По результатам наших исследований ЭГМ железнение обуславливает несколько иной процесс образования трещин: так как за счет воздействия выглаживающего инструмента слоистости в покрытии не возникает, то и продольных трещин также не возникает. Около поперечных трещин, имеющих в покрытии, повышено содержание хлора и других примесных элементов, однако водорода в покрытии крайне мало, что положительно влияет на такое свойство, как хрупкость. В общем случае густота сетки трещин (то есть количество трещин на единицу площади поверхности) больше у ЭГ покрытия без механического воздействия.

Размеры зерен ЭГ и ЭГМ покрытия характеризуются степенью дисперсности, которая выражается в среднем размере зерен. Дисперсность структуры электролитических покрытий зависит от природы осаждаемого металла и условий электролиза и определяется соотношением скоростей зарождения и роста кристаллитов. В тех случаях, когда скорость образования зародышей превалирует над скоростью их роста, на катоде формируются мелкокристаллические или ультрадисперсные осадки. По данным [5] электроосаждение железа происходит с высоким перенапряжением катода и в условиях выделения на катоде водорода, причем доля его может быть очень велика (до 85 %). Выделение водорода способствует активизации катода за счет десорбции инородных атомов и молекул с его поверхности. При этом увеличивается число активных центров зарождения кристаллитов и повышается вероятность зародышеобразования. В дальнейшем выделяющийся водород адсорбируется на зародышах ("барьер"), препятствуя их нормальному росту. Совокупность этих факторов обуславливает мелкокристаллическую структуру осадка.

ЭГМ покрытие обуславливает другие размеры зерен в связи с механической активацией, которая вносит свой вклад в получение мелкозернистых осадков: возможно, что удаление инородных атомов при активации выглаживающим инструментом идет более активно и число активных центров зарождения увеличивается.

Рассчитать размер зерна ЭГ покрытия без механического воздействия с помощью металлографического микроскопа при

увеличении до $\times 2000$ не представляется возможным, так как его размер находится в пределах 10^{-5} - 10^{-6} см [5]. При применении механической активации наблюдаем, что размер получившегося зерна даже менее, чем 10^{-6} - 10^{-7} см, то есть ультрамелкодисперсный (рис. 4).

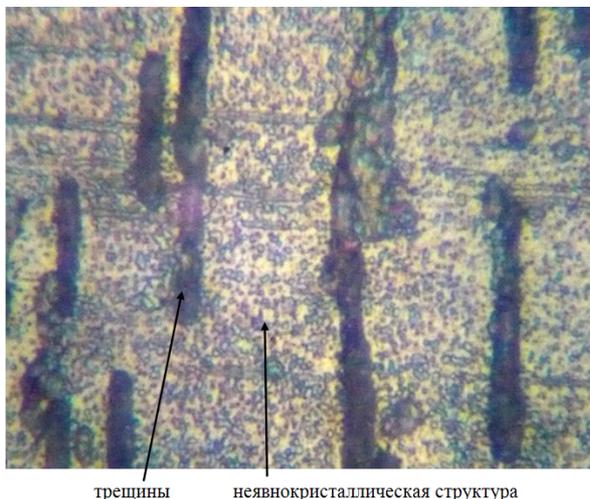


Рис. 4. Ультрамелкодисперсная структура ЭГМ покрытия, $\times 2000$

ВЫВОДЫ

Толстослойное ЭГМ покрытие содержит значительно ниже допустимых значений величину вредных примесей (водород - 0,0043%, сера - 0,0021%). Использование выглаживающего инструмента уменьшает содержание окислов и вредных примесей (в том числе водорода), что позволяет получать плотные одно-

родные железные покрытия повышенной толщины (1,5 – 1,8 мм). Внутренняя структура ЭГМ покрытия состоит из ультрамелкодисперсных зерен размером $\sim 10^{-6}$ - 10^{-7} мм. Это меньше размеров зерен в электрогальванических ЭГ покрытиях ($\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} мм), и гораздо меньше размеров зерна металлургического железа ($\sim 10^3$ мм). Установлено, что применение механического воздействия устраняет слоистость и делает структуру покрытия более равномерной, плотной, мелкодисперсной и уменьшает густоту сетки трещин, которая больше у ЭГ покрытия, формируемого без механического воздействия.

Литература

1. Анализ эффективности существующих методов ремонта коленчатых валов дизеля 5Д49 / Сб. науч. тр., Укр. гос. ак-я. ж/д транспорта [Электронный ресурс]: Режим доступа: URL: http://www.nbuiv.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009_107/n107-71.-2009.g.
2. Спицин, И.А. Новые технологические процессы восстановления деталей машин гальваническими покрытиями [Текст] / И.А. Спицин, И.Г. Голубев. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 48 с.
3. Толчеев, А. В. Разработка технологии и установки для толстослойного восстановления деталей осталиванием [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Толчеев Алексей Владимирович. - Воронеж, 2008. 170 с.
4. Хомяков, В.Г. Технология электрохимических производств [Текст] / В.Г. Хомяков, В.П. Машовец, Л.Л. Кузьмин. - М.-Л.: ГНТИХЛ. 1949. — 674 с.
5. Ковенский, И.М. Металловедение покрытий [Текст] / И.М. Ковенский, В.В. Поветкин - М.: "СП Интермет Инжиниринг", 1999.- 296с.

Воронежский государственный технический университет

INFLUENCE OF MECHANICAL STRESS DURING THE DEPOSITION ON THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THICK ELECTROGALVANICMECHANICAL COVERED WITH IRON

O.V. Gorozhankina, Senior lecturer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: winter.07@mail.ru

Technology electrogalvanicmechanical cement are promising direction size of the recovery in the repair of worn oversized shafts. When using these techniques it will be possible to recover up to 60 - 70% of large parts without destruction.

For coating with optimal performance, you must have clear and as full as possible representation of their composition and structure, which are definable link between deposition conditions and properties of the coatings.

This article first describes the effect of mechanical action instrument in the process of deposition on the composition and structure of the resulting thick coating of iron, which gives the possibility to choose the optimal mode of application electrogalvanicmechanical (EGM) coatings and forecasting work parts with coatings EGM.

As objects of study chosen thick-layer coating on steel samples 30 obtained by electrogalvanic (EG) and EGM cement, when co-precipitation and mechanical activation of the deposited layer.

The results showed that the coating contains high build EGM far below the value of the quantity of harmful impurities (hydrogen - 0.0043%, sulfur - 0.0021%). Use of a smoothing tool and reduces the content of harmful impurity oxides (includ-

ing hydrogen), which allows to obtain homogenous dense coatings of iron increased thickness (1.5 - 1.8 mm). EGM internal structure of the coating is composed of ultrafine grain size $\sim 10^{-6}$ - 10^{-7} mm, oriented in different directions. This is less than the size of the grains in electrogalvanic EG coatings ($\sim 10^{-5}$ - 10^{-6} mm), and much smaller than the metallurgical iron grains ($\sim 10^{-3}$ mm). It was found that the use of mechanical action eliminates layering and coating makes the structure more uniform, dense, fine mesh density and reduces fracture, which is greater in the EG coating without mechanical action

Key words: electrogalvanicmechanical cement, high build coating, mechanical properties, structure

References

1. Analys effektivnosti sushestvuyshih metodov remonta kolenchatyh valov dizelia 5D49 [electronui resurs] / Sb. naush. tr., Ukr. gos. ak-ya. zh/d transporta – Rezhim dostupa: URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Znpudazt/2009_107/n107-71.-2009.
2. Spitsin, I.A., Golubev, I.G. Novue tehnologisheckie processu vosstanovleniia detalei mashin galvanicheskimi pokrutiami [Text] - M: FGNU "Rosinformagroteh", 2001. - 48 c.
3. Tolcheev, A.V. Razrabotka tehnologii I ustanovki dlya tolstosloinogo vosstanovleniia detalei ostalivaniem [Text] / dis. kand. tehn. nauk: 05.03.01 - Voronezh, 2008. 170 c
4. Khomyakov, V.G., Mashovets, V.P., Kuzmin, L.L. Technologia electrochimisheckikh proizvodstv [Text] - M.-L. : GNTIHL. 1949. - 674 c.
5. Kovenskiy, I.M., Povetkin, V.V. Metallovedenie pokrutyi [Text] - M. : "SP Internet Engineering", 1999.- 296c.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е.С. Афанасьева, А.В. Бабкин, А.В. Солопченко, А.В. Кепман,
Э.М. Эрдни-Горяев, А.М. Кудрин**

Развитие авиакосмической отрасли, где уже нашли применение полимерные композиционные материалы, а также расширение возможных областей их применения формируют повышенные требования к уровню их прочностных свойств. На сегодняшний день одним из перспективных направлений улучшения механических свойств материалов является применение различных наноразмерных структур. Большим потенциалом по улучшению свойств обладают углеродные нанотрубки различного строения. Свойства углеродных нанотрубок, обеспечивающие улучшение свойств материалов на их основе, одновременно являются причиной ряда технологических проблем, связанных с трудностями по их введению и равномерному распределению в различных системах.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств эпоксидных связующих, применяемых для изготовления изделий авиационного назначения, при введении в них углеродных одностенных нанотрубок, а также поиску эффективных способов их диспергирования и снижения агломерации в объеме материала. В качестве основных способов улучшения диспергирования рассматривали химическую модификацию углеродных нанотрубок карбоксильными группами и применение различных механических методов при их введении и отверждении образцов. Смеси изготавливали в реакторе с якорной мешалкой при различной температуре под вакуумом, затем приготовленное связующее помещали в металлические формы и отверждали по заданному режиму. Массовая доля нанотрубок в связующих составляла 0,2 %. При смешении смеси удалось достаточно эффективно диспергировать нанотрубки в объеме связующих, однако при последующей выдержке уже в течение одного часа наблюдалась агломерация нанотрубок. Отверждение при повышенной температуре до 120-180 °С способствовало дальнейшей агломерации и структурированию нанотрубок, что не удалось устранить дополнительным воздействием вибрации и добавлением добавки Aerosil. Исследования микроструктуры отвержденных образцов связующих с углеродными нанотрубками с помощью электронного микроскопа показали наличие областей с относительно равномерным распределением нанотрубок по объему, областей без них и агломератов диаметром порядка 10 мкм. На микрофотографиях отчетливо видны агломераты, представляющие собой значительное количество соединенных между собой нанотрубок, что может быть характерно именно для гибких одностенных нанотрубок с наибольшим отношением длины к диаметру. При этом на микрофотографиях не отмечено влияния на дисперсность различных методов изготовления образцов.

Исследование механических свойств связующих с углеродными нанотрубками показало близкие значения предела прочности и модуля упругости при растяжении ($\sigma = 60-80$ МПа, $E = 2,5-3,2$ ГПа) и изгибе (140-150 МПа, $E = 2,7-3,8$ ГПа) у исходных и модифицированных образцов. При этом отмечено большее влияние нанотрубок на повышения модуля упругости связующих. Получено существенное улучшение показателей трещиностойкости связующих с преимуществом на некоторых образцах до 90% со значениями величины коэффициента интенсивности напряжения K_{Ic} до 0,87 МПа/м² и энергии разрушения на единицу поверхности G_{Ic} до 0,47 кДж/м², что может быть полезным для материалов, работающих в условиях повышенных ударных нагрузок

Ключевые слова: одностенные углеродные нанотрубки, эпоксидные смолы, механические характеристики, трещиностойкость, агломерация

Углеродные нанотрубки (УНТ) с недавних пор привлекают повышенный интерес исследователей, благодаря своим уникальным свойствами по прочности, термостабильности и электропроводности. Многими исследованиями показано, что углеродные нанотрубки могут быть эффективным инструментом модификации прочностных свойств полимерных композиционных

материалов [1-5], в частности, на основе эпоксидных смол, применяемых в авиационной промышленности. Однако, реализация улучшенных характеристик композиционных материалов при использовании нанотрубок связана с рядом характерных для них трудностей, склонностью к агломерации и низким соотношением между нанотрубками и связующим.

На сегодняшний день для улучшения диспергируемости нанотрубок в составе композиционных материалов используют механические и химические методы [2, 6]. Кроме того, используют различные способы введения нанотрубок, например, в составе предварительно изготовленных концентрированных смесей смол с нанотрубками (называемые также «мастербатчи»), либо в виде растворов в различных растворителях [1].

Механические методы, такие как ультразвуковое воздействие, центрифугирование и смешение при высоких сдвиговых нагрузках позволяют улучшить диспергируемость нанотрубок, но при этом в некоторых случаях могут приводить к снижению их длины. Кроме того, механические методы не дают постоянного эффекта по дисперсности нанотрубок [7].

Афанасьева Екатерина Сергеевна – МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, тел. 8(495) 9393592

Бабкин Александр Владимирович – МГУ им. М.В. Ломоносова, младший научный сотрудник, тел. 8(495)9394791

Солопченко Александр Викторович – МГУ им. М.В. Ломоносова, ведущий инженер, тел. 8(495)9394791

Кепман Алексей Валерьевич - МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, тел. 8(495)9393592

Эрдни-Горяев Эрдни Михайлович – МГУ им. М.В. Ломоносова, инженер, тел. 8(495)9393592

Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел. 8(951)5569251

Химические методы включают физическую или химическую модификацию (функционализацию) их поверхности за счет применения либо в первом случае различных поверхностно активных веществ, либо веществ, способствующих образованию химических связей между поверхностью нанотрубок и полимерным связующим. Отмечено существенное улучшение диспергируемости и сродства нанотрубок различным связующим при проведении их окисления с образованием на поверхности карбоксильных, карбонильных или гидроксильных групп. Кроме того, возможна, дальнейшая модификация нанотрубок после окисления с образованием на их поверхности различных функциональных групп: аминных, эпоксидных, эфирных, силоксановых, хлор-, фторсодержащих и др. [8, 9].

Агломерация углеродных нанотрубок зависит от ряда факторов, в т.ч. их структуры, размера и числа графеновых плоскостей. Различают одностенные и многостенные углеродные нанотрубки. Одностенные нанотрубки представляют собой цилиндрические структуры, состоящие из одной свёрнутой в трубку графеновой плоскости. Подобная структура может способствовать большей агломерации благодаря большей подвижности и гибкости молекулы в сравнении с многостенными нанотрубками, состоящими из двух и более слоев. Кроме того, одностенные нанотрубки характеризуются большим отношением длины к диаметру. Следует отметить, что, несмотря на улучшенную диспергируемость многостенных нанотрубок, они в меньшей степени способствуют равномерному распределению нагрузки при механических воздействиях.

Целью настоящего исследования была оценка возможности улучшения прочностных свойств эпоксидных связующих, используемых для изготовления деталей самолетов из полимерных композиционных материалов, за счет введения в состав одностенных углеродных нанотрубок, поверхность которых была модифицирована карбоксильными группами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные вещества

Углеродные одностенные нанотрубки производства компании OSCIAL (Россия) применяли в виде предварительно изготовленной производителем смеси нанотрубок в эпоксидной смоле DER 330 («DowChemicalCompany», Швейцария) «мастербатча» с содержанием нанотрубок в количестве 2 % мас. Одностенные нанотрубки в составе смеси имели диаметр $1,8 \pm 0,3$ нм, длину более 5 мкм и были модифицированы карбоксильными группами.

Исследуемые эпоксидные связующие марок Т67 и Т99 производства компании ЗАО «ИНУМиТ» (Россия) представляли собой двухкомпонентные системы, включающие смеси эпоксидных смол на

основе бисфенола А и эпихлоргидрина и ароматических и алифатических диаминов.

Мастербатч с нанотрубками добавляли в эпоксидные связующие из расчета содержания нанотрубок в связующем 0,2 % мас.

Методика изготовления образцов

В реактор для смешения связующего с якорной мешалкой помещали компоненты связующего и мастербатч, перемешивали при температуре под вакуумом, затем приготовленное связующее помещали в металлические формы и отверждали по заданной температурной программе.

Методики изготовления связующих Т67 и Т99 с нанотрубками приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Методы испытания образцов

Для оценки дисперсности смеси и качества смешения связующих с мастербатчем в процессе изготовления образцов периодически проводили отбор проб. Дисперсность оценивали путем размазывания отобранной пробы связующего тонким слоем (около 20 мкм) на поверхности стекла. Кроме того, после добавления каждого компонента (мастербатча, отвердителя) также проводили оценку однородности аналогичным способом для исключения возможности того, что какой-либо из них может вызывать агломерацию.

Испытания на растяжение проводили согласно стандарту ASTM D 638 на плоских образцах в форме лопатки. Образцы толщиной около 2 мм, длиной $210 \pm 0,3$ мм, шириной рабочей зоны 13 мм изготавливали методом прецизионной резки на фрезерном станке с ЧПУ COMAGRAV2. Испытания проводили при комнатной температуре на разрывной машине TiniusOlsen H5KSc датчиком нагрузки 5 кН и экстензометром Epsilon 3560-BIA-050M-005-HT2 с рабочим расстоянием 50 мм при скорости перемещения 5 мм/мин. Для каждого типа связующего испытывали не менее 7 образцов.

Прочность при изгибе определяли в соответствии с ASTM D790 методом трехточечного изгиба. Образцы представляли собой полоски прямоугольного сечения с толщиной 2-3 мм, шириной 12 мм, и длиной 70 мм. Расстояние между опорами устанавливали равным 16 толщинам.

Испытания проводили на разрывной машине TiniusOlsen H5KS с датчиком нагрузки 5 кН. Скорость перемещения нагружающей опоры задавали равной 1,28 мм/мин.

Показатели трещиностойкости, выраженные в величинах коэффициента интенсивности напряжения, K_{Ic} , и энергии разрушения на единицу поверхности, G_{Ic} определяли в соответствии со стандартом ASTM D 5045. Образцы на изгиб с первоначальным надрезом (SENB) изготавливали путем механообработки на фрезерном станке COMAGRAV2. Далее создавали трещину тонким лезвием, прокалывая (надрезая) область внутри зазора. Нагружение образцов проводили со скоростью 10 мм/мин на универсальной испытательной машине TiniusOlsen H5KS с датчиком усилия до 5 кН и шагом 0,3 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Диспергирование углеродных нанотрубок

Результаты визуальной оценки дисперсности смеси показали отсутствие агломерации и хорошую равномерность после 30 минут смешения образцов.

После проведения смешения и выдержки в течение 1 часа при комнатной температуре во всех образцах на основе связующего Т67 визуально наблюдали начальную агломерации углеродных нанотрубок. Несмотря на закономерное значительное возрастание вязкости связующего при введении нанотрубок, вязкость связующего Т67 достаточно низкая и, по-видимому, не препятствует процессу агломерации. Соответственно, при проведении отверждения при повышенных температурах до 80 °С вязкость системы существенно ниже и, вероятно, не компенсируется образованием сшитой трехмерной сетки при отверждении связующего, что приводит к дальнейшей агломерации и структурированию углеродных нанотрубок. Также возможным объяснением может быть фазовое разделение смеси, инициируемое процессом полимеризации. При определенной степени полимеризации, смесь становится нестабильной и происходит ее расслоение, приводящее к дальнейшей агломерации нанотрубок.

Эффект структурирования нанотрубок при отверждении при повышенной температуре уже наблюдали в других работах [10], где, в частности, отмечается необходимость постоянного мониторинга состояния системы на каждой стадии изготовления композиционного материала с нанотрубками для своевременного принятия мер по возможному снижению происходящего структурирования.

Оценка образцов связующих после отверждения показала наличие в пластинах небольших дефектов и пузырей, которые, по-видимому, не удалось полностью удалить при вакуумировании связующего из-за его высокой вязкости. Причем дополнительное вакуумирование образца при отверждении не привело к устранению вышеуказанных дефектов.

Поскольку в состав связующего Т67 входят алифатические амины, которые являются достаточно активными отвердителями, было сделано предположение о том, что агломерации может способствовать реакция отвердителя с карбоксильными группами на поверхности нанотрубок. Для исключения этого фактора было исследовано эпоксидное связующее Т99, где в качестве отвердителя использовали ароматический диамин. В процессе отверждения связующего Т99 с нанотрубками наблюдали еще большую агломерацию нанотрубок по сравнению с Т67, причем, в отвержденных образцах связующего агломерация стала заметна визуально и привела к получению высокопористых образцов с существенными дефектами поверхности (рис. 1). Введение в состав связующего Т99 дополнительной

Таблица 1

Методики изготовления смеси связующего Т67 с углеродными нанотрубками

Образец	Способ смешения	Режим отверждения
Т67-0,2-1	Смешение связующего с мастербатчем - 30 мин, перемешивание после добавления отвердителя - 15 мин	80°С - 5 часов 120°С - 6 часов
Т67-0,2-2	Смешение связующего с мастербатчем на водяной бане при температуре 55°С - 30 мин; перемешивание после добавления отвердителя - 15 мин	80°С - 5 часов 120°С - 6 часов
Т67-0,2-3	Смешение при температуре 22-27°С -30 мин с поочередным добавлением каждого компонента и перемешиванием 10 мин с периодической проверкой однородности	Нагрев и выдержка в течение 30 мин при 80°С под вакуумом. Отверждение 80°С - 5 часов 120°С - 6 часов

Таблица 2

Методики изготовления смеси связующего Т99 с углеродными нанотрубками

Образец	Способ смешения	Режим отверждения
Т99 исходный	Смешение при 80 °С (вакуум)	180 °С - 3 часа, виброшкаф
Т99-1 (0,2 % мас. нанотрубок)	Смешение при 80 °С (вакуум)	180 °С - 3 часа, виброшкаф
Т99-2 (0,2% мас. нанотрубок+3 % мас. Aerosil)	Смешение эпоксидной смолы с аэросилом под вакуумом в течение 30 мин; нагрев до 80°С, введение мастербатча и отвердителя, смешение под вакуумом в течение 30 мин	180 °С - 3 часа, виброшкаф
Т99-3 (Т99+3% мас. Aerosil)	Смешение эпоксидной смолы с аэросилом под вакуумом в течение 30 мин; нагрев до 80°С; введение отвердителя и смешение под вакуумом в течение 15 мин	180 °С - 3 часа, виброшкаф

Микроструктуру отвержденных образцов связующих изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega3 LMU при ускоряющем напряжении 20 кВ. На сколы образцов перед съёмкой напыляли тонкий 20-40 нм слой золота для стекания заряда.

добавки Aerosil для возможного исключения или создания препятствия агломерации нанотрубок также не привело к получению желаемого результата.



Рис. 1. Агломерация углеродных нанотрубок в отвержденных образцах Т99-1

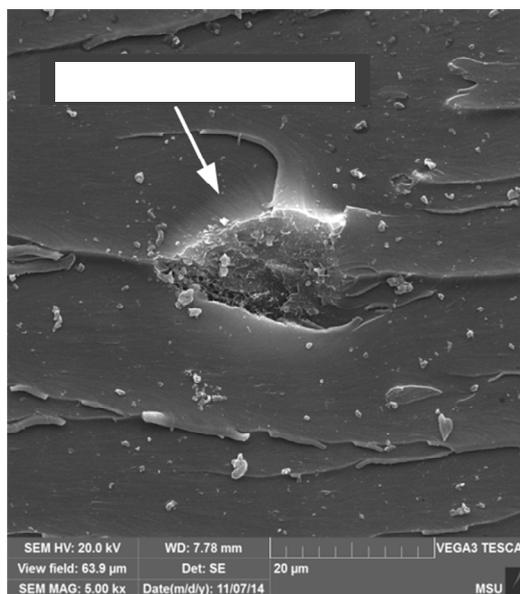
Для исключения образования пор и улучшения качества образцов отвержденных связующих помимо вакуума при отверждении применяли воздействие вибрации. Этим способом удалось получить образцы без газообразных включений (пузырей), но в случае образцов на основе связующего Т99 вибрация способствовала более интенсивной агломерации нанотрубок.

Исследования микроструктуры отвержденных образцов связующих Т67 и Т99 с углеродными нанотрубками с помощью электронного микроскопа подтвердили неравномерное распределение нанотрубок. На микрофотографиях образцов видно наличие областей с относительно равномерным распределением нанотрубок (рис. 2с) в объеме матрицы, областей без них (рис. 2b) и агломератов диаметром порядка 10 микрон (рис. 2d, 2е, 2g). На микрофотографиях можно видеть агломераты, представляющие собой значительное количество соединенных между собой нанотрубок. В случае эпоксидного связующего Т99 на микрофотографиях наблюдается значительное количество агломератов нанотрубок в отличие от более гомогенной смеси на основе связующего Т67, а также наличие агломератов размером более 10 мкм (рис.2g, 2h). На рисунках 2с и 2d для связующего Т67 в том числе можно видеть и отдельные хорошо диспергированные молекулы углеродных нанотрубок. При этом на микрофотографиях не отмечено влияния на дисперсность различных методов изготовления образцов на основе связующего Т67.

Ряд исследований нанотрубок в составе связующих показывают, что существует

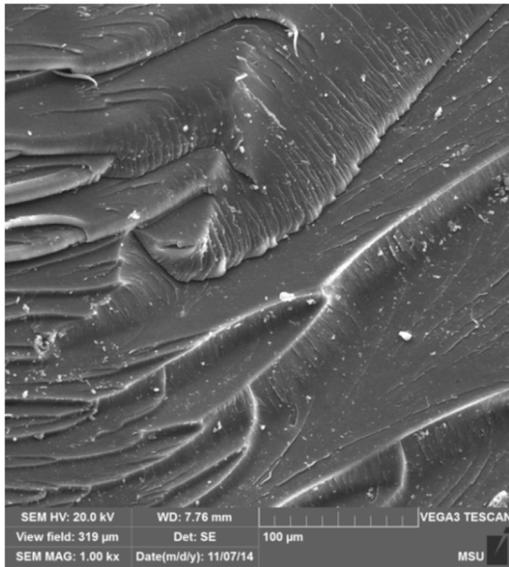
критическая концентрация нанотрубок в системе, при которой начинает происходить их агломерация. Например, в работе [6] делают предположение о зависимости этой критической концентрации от соотношения длины и диаметра нанотрубок. Чем больше соотношение сторон УНТ, тем при более низкой концентрации УНТ способны агломерировать друг с другом. Также предположительно существует верхняя граница по концентрации, выше которой агломерация затруднена из-за высокой вязкости системы. Существует понятие порога перколяции, при котором нанотрубки образуют трехмерную структуру, что сопровождается резким ростом модуля упругости и выходом значений вязкости системы на плато.

В разных исследованиях приводятся различные значения концентрационных порогов перколяции, что предположительно может быть связано с различным соотношением длины и диаметра применяемых нанотрубок и типом связующих. В работе [6] для одностенных нанотрубок порог перколяции составляет 0,5 % масс. Для многостенных нанотрубок в работе [11] получено значение 2 % масс. В работах [12] и [13] 0,12 % масс. и 0,5 % объемн., соответственно.

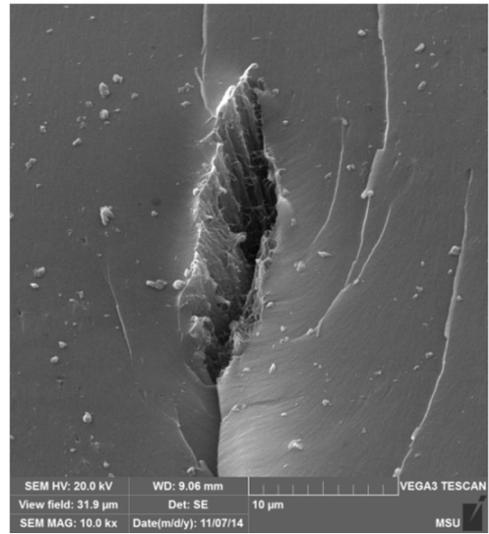


a

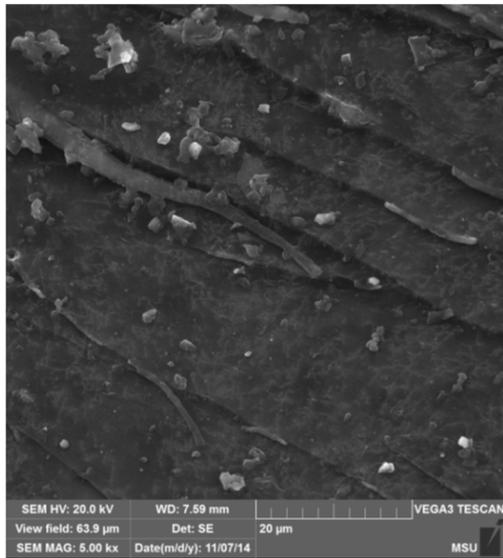
Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов отвержденных эпоксидных связующих: а, b – образец Т67-0,2-1; с,d - образец Т67-0,2-2; е, f - образец Т67-0,2-3; g, h – образец Т99-2



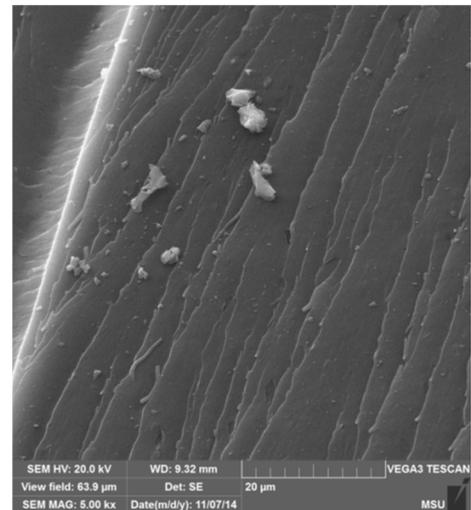
b



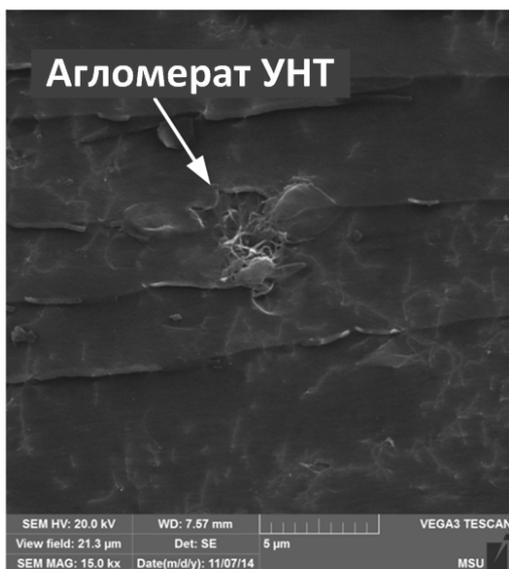
e



c



f

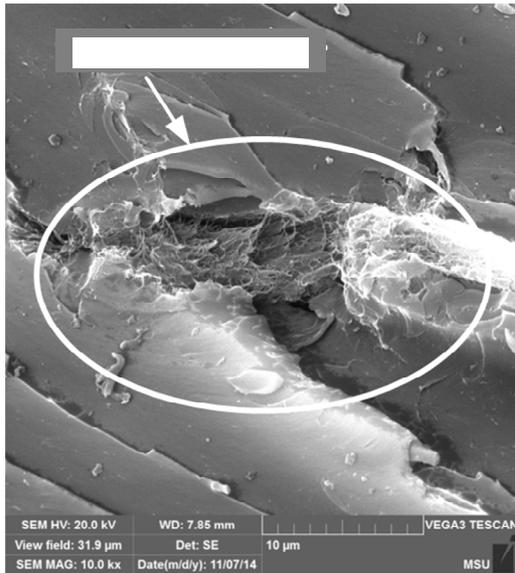


d



g

Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов отвержденных эпоксидных связующих: а, б – образец Т67-0,2-1; с, д - образец Т67-0,2-2; е, ф - образец Т67-0,2-3; г, h – образец Т99-2 (продолжение)



h

Рис. 2. Микрофотографии поверхности образцов отвержденных эпоксидных связующих: а, b – образец Т67-0,2-1; с, d - образец Т67-0,2-2; е, f - образец Т67-0,2-3; g, h – образец Т99-2 (окончание)

Можно предположить, что для исследуемых в данной работе одностенных углеродных нанотрубок эта концентрация существенно ниже и находится в диапазоне около 0,005 - 0,01 %. Кроме того, высокая гибкость, характерная для одностенных нанотрубок, и, по-видимому, высокое соотношение длины и диаметра, способствующие их скручиванию в клубки, также вносят вклад в процесс их агломерации. При рассматриваемой в работе концентрации нанотрубок 0,2 % мас. даже химическая модификация карбоксильными группами не привела к снижению или устранению данного процесса.

Механические свойства эпоксидных связующих с углеродными нанотрубками

Данные механических испытаний образцов связующих, модифицированных нанотрубками, показали незначительное изменение прочностных и упругих характеристик по сравнению с исходной матрицей (табл. 3,4). Как известно, основными факторами, оказывающими влияние на механические свойства систем с нанотрубками являются адгезия связующих к наполнителям и дисперсность последних. По-видимому, происходящая в процессе отверждения агломерация нанотрубок не позволяет в полной мере реализовать их потенциал по улучшению прочностных свойств эпоксидных матриц. Кроме того, высокая вязкость связующих из-за наличия в составе нанотрубок затрудняет вакуумирование и приводит к получению недостаточно качественных образцов и, соответственно, большим разбросам получаемых характеристик и низкой их воспроизводимости.

Таблица 3

Механические характеристики эпоксидных связующих с углеродными нанотрубками при растяжении

Образцы	Предел прочности при растяжении, σ , МПа	Модуль упругости при растяжении, E^+ , ГПа	Остаточная деформация, ϵ , %
Т67 исходный	85±7	3.17±0.06	3.67±0.58
Т67-0,2-1	60±11	3.20±0.02	2.20±0.55
Т67-0,2-2	82±8	3.34±0.03	3.53±0.66
Т67-0,2-3	65±9	3.19±0.02	2.62±0.48
Т99 исходный	76±4	2.47±0.02	5.46±0.75
Т99-1	73±2	2.49±0.01	4.80±0.31
Т99-2	68±5	2.57±0.01	4.14±0.72
Т99-3	66±8	2.52±0.03	4.11±0.83

Таблица 4

Механические характеристики эпоксидных связующих с углеродными нанотрубками при изгибе

Образцы	Предел прочности при изгибе, σ , МПа	Модуль упругости при изгибе, E , ГПа
Т67 исходный	174±14	3.78±0.27
Т67-0,2-1	153±5	3.73±0.05
Т67-0,2-2	142±7	3.56±0.07
Т67-0,2-3	151±10	4.05±0.28
Т99 исходный	144±8	2.58±0.15
Т99-1	139±10	2.67±0.18
Т99-2	142±3	2.77±0.12
Т99-3	148±12	2.81±0.37

Полученные значения механических характеристик отвержденных образцов связующих очень хорошо отражают большую или меньшую степень агломерации нанотрубок, отмеченную в процессе отверждения. Применение различных способов, способствующих диспергированию нанотрубок в матрице, не повлияло на механические характеристики отвержденных образцов связующих. Как видно из представленных данных, большая агломерация нанотрубок в составе связующего Т99 по сравнению с Т67 сказалась в большей степени и на уровне механических характеристик отвержденных образцов. В частности, образцы, полученные при воздействии вибрации, показывают наиболее низкий уровень механических характеристик, что коррелирует с данными по наибольшей агломерации нанотрубок в этих образцах.

Оценка параметров трещиностойкости исследованных образцов с нанотрубками дала противоположенный результат, видимо, вследствие

разного механизма развития разрушения. Как видно из данных табл. 5, применение углеродных нанотрубок позволяет существенно повысить трещиностойкость композиций на их основе, например, для связующего Т99 получено повышение значения показателя энергии разрушения G_{1c} до 90%. В случае разрушения образцов при растяжении или изгибе процесс с учетом наличия областей без нанотрубок может проходить по стандартному механизму и влияния нанотрубок не отмечается. С точки зрения трещиностойкости, вероятно, нанотрубки, даже в большей степени в виде агломератов, могут препятствовать или сдерживать развитие трещин в образцах. Благодаря их высокой эластичности и, как следствие, способности поглощать большое количество энергии скорость образования трещин в образцах может быть существенно ниже, что в совокупности с высокой адгезией между нанотрубками и эпоксидным связующим приводит к улучшению трещиностойкости отвержденных образцов.

Таблица 5
Параметры трещиностойкости эпоксидных связующих с углеродными нанотрубками

Образцы	G_{1c} , кДж/м ²	Δ , %	K_{q1} , МПа/м ²	Δ , %
Т67 исходный	0.156±0.02		0.580±0.06	
Т67-0,2-1	0.204±0.04	31	0.716±0.09	23
Т67-0,2-2	0.215±0.07	38	0.726±0.13	25
Т67-0,2-3	0.264±0.08	70	0.679±0.13	17
Т99 исходный	0.249±0.07		0.718±0.04	
Т99-1	0.341±0.08	37	0.775±0.12	8
Т99-2	0.412±0.12	65	0.851±0.16	18
Т99-3	0.471±0.06	90	0.870±0.06	21

Полученные данные по существенному улучшению показателей трещиностойкости показывают большой потенциал по использованию нанотрубок именно для целевого улучшения этих параметров.

ВЫВОДЫ

Проведенными исследованиями показано, что при смешении компонентов связующего можно достаточно эффективно диспергировать и снизить агломерацию нанотрубок, однако, уже при небольшой выдержке связующего после смешения даже при комнатной температуре, несмотря на существенное возрастание его вязкости при введении нанотрубок, начинает происходить их агломерация. Последующее отверждение связующего при повышенных температурах способствует дальнейшему структурированию нанотрубок в системе. Кроме того, повышенная

вязкость связующего с нанотрубками, а, возможно, в том числе и их агломерация, затрудняет вакуумирование системы и получение качественных бездефектных образцов. Результаты исследований показывают, что рассматриваемая концентрация углеродных нанотрубок в связующем 0,2% мас. находится в концентрационном диапазоне их агломерации. Механические характеристики отвержденных образцов на основе исходных связующих и связующих, модифицированных нанотрубками, близки, что по-видимому является следствием недостаточно полного диспергирования последних и показывает необходимость дальнейшего поиска эффективных методов улучшения диспергирования УНТ в подобных системах для получения положительных результатов. При этом исследуемые нанотрубки обладают большим потенциалом по улучшению трещиностойкости связующих и, соответственно, композиционных материалов на их основе, что может быть полезным для материалов, работающих в условиях повышенных ударных нагрузок.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения Постановления правительства №218, соглашение №02.G25.31.0114 (шифр 2014-218-05-8228).

Литература

- Domun N., Hadavinia H., Zhang T., Sainsbury T., Liaghata G. H., Vahida S. Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials – a review of the current status / *Nanoscale*. – 2015. - №7. – p.10294–10329.
- Inam, F. and Luhyna, N. Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites. A Review on Recent Developments // In proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications. - Wrexham, UK, 2012. – p. 80-86.
- Moosa A.A., Ramazani A. S. A., Ibrahim M.N. Effects of Carbon-Nanotubes on the Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Nanocomposites / *International Journal of Current Engineering and Technology*. – 2015. - №5. – p.3253.
- Muhammad Ismail A.H., Risby M.S., Ali A., Sapuan S.M., Hoque M.E. Flexural strength and fracture toughness of carbon Nanotubes (CNTs) reinforced epoxy composites // In Proceedings of Seventh The IIER International Conference. - Singapore, 2015. – p.44-48.
- Mohamed I., Saleh N. J., Mohmoud L. H. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Carbon Nanotubes Composite / *College of Engineering Journal (NUCEJ)*. – 2015. - №1. – p84-90.
- Uzunpinar C., Mosiewicki M.A., Auad M.L. Effect of SWCNT Dispersion on Epoxy Nanocomposite Properties / *Polymer Composites*. – 2012. - №33. – p.582-588.
- Gkikas G, Barkoula NM, Paipetis AS. Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy / *Composites, Part B*. – 2012. - №43. – p.2697.
- Fan-Long Jin, Soo-Jin Park: Recent Advances in Carbon-Nanotube-Based Epoxy Composites – Review / *Carbon Letters*. – 2013. - №1. – p.1-13.

9. Francisco W., Vargas Ferreira F., Vargas Ferreira E., de Simone Cividanes L. Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotube and Mechanical Property of Epoxy-Based Nanocomposite / Journal of Aerospace Technology and Management. – 2015. - №3. – p.289-293.

10. Aravand M., Lomov S. V., Verpoest I., Gorbatiikh L. Evolution of carbon nanotube dispersion in preparation of epoxy-based composites: From a masterbatch to a nanocomposite / Express Polymer Letters. – 2014. - №8. – p. 596-608.

11. Poetschke P., Fornes T.D., Paul D.R. Rheological

behavior of multi-walled carbon nanotube/polycarbonate composites / Polymer. – 2002. - №43. – p.3247.

12. Du F., Scogna R.C., Zhou W., Brand S., Fischer J.E., Winey K.I. Nanotube networks in polymer nanocomposites: Rheology and electrical conductivity / Macromolecules. – 2004. - №37. – p.9048.

13. Kinloch I.A., Roberts S.A., Windle A.H. A rheological study of concentrated aqueous nanotube dispersions / Polymer. – 2002. - №43. – p.7483.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «Инновационные технологии в авиастроении»
Воронежского государственного технического университета

MECHANICAL PROPERTIES OF SWCNT MODIFIED EPOXY RESINS FOR FIBER REINFORCED COMPOSITES

E.S. Afanaseva, Candidate of Engineering Sciences, Research Assistant, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, katrine.news@gmail.com

A.V. Babkin, Research Assistant, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, alexandr.babkin@gmail.com

A.V. Solopchenko, Engineer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, metilmsu@gmail.com

A.V. Kepman, Candidate of Chemical Sciences, Research Officer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, alexkep@inunit.ru

E.M. Erdni-Goryaev, Engineer, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, erdnigoryaev.msu@gmail.com

A.M. Kudrin, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail:kudrin.ru@gmail.com.

Development of the aerospace industry, which has already used polymer composite materials, as well as the possible expansion of the areas of their application, generates increased requirements to their mechanical properties. Today one of the most promising directions for improving the mechanical properties of materials is the use of various nano-sized structures. Great potential to improve the properties have different structures of carbon nanotubes, in particular, single-walled, double-walled and multi-walled nanotubes. The properties of carbon nanotubes provided improved properties of materials are both a cause of a number of technological problems in difficulties of their distribution in the various systems.

The properties of epoxy resins for the aerospace application modified with oxidized single-walled carbon nanotubes (SWCNT) were investigated. Also the effective ways to reduce the nanotubes dispersion and agglomeration in the volume of material were searched. As main methods for improving nanotubes dispersion considered chemical modification the carbon nanotubes with the carboxyl groups and use of various mechanical methods for their introduction and curing of samples. Epoxy components of the resin and masterbatch with SWCNT were placed into the reactor with an anchor stirrer. Stirring was carried out at high temperature in vacuum. Then hardeners were added and the procedure repeated again. Prepared mixture was placed in a metal mold and cured. Masterbatch with SWCNT was added to epoxy resins to get a concentration of nanotubes in the mixture of 0.2 wt.%. After mixing, nanotubes were effectively dispersed in resin. However, during the subsequent one-hour exposure agglomeration of nanotubes was observed. Curing at high temperatures (120-180°C) promoted to further agglomeration and structurization of nanotubes. Vibration and Aerosil addition didn't manage to eliminate agglomeration. SEM micrographs of the samples showed an appearance of regions of a relatively even distribution SWCNTs in the volume of the matrix, areas without SWCNTs and clusters of SWCNTs with diameter about 10 microns. Clusters of highly entangled nanotubes could readily be identified in these micrographs that can be typical for flexible SWCNT with the largest aspect ratio. The difference in microstructure of samples depending on method of preparation for system T67-SWCNT was not noted.

The mechanical properties of epoxy resins with SWCNT were similar for neat and modified samples. The ultimate tensile strength and tensile modulus were 60-80 MPa and 2.5-3.2 GPa respectively. The flexural strength and flexural modulus were 140-150 MPa and 2.7- 3.8 GPa respectively. The more influence of SWCNT on modulus was noted. The significant improvement of fracture toughness up to 90% was observed that can be useful for materials under high shock loads. The energy per unit area of crack surface up to G_{Ic} was up to 0.47 kJ/m² and the the critical-stress-intensity factor K_{Ic} was up to 0.87 MPa/m²

Key words: single-walled carbon nanotubes, epoxy resins, mechanical properties, fracture toughness, agglomeration

References

1. Domun N. , Hadavinia H., Zhang T., Sainsbury T., Liaghata G. H., Vahida S. Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials – a review of the current status / *Nanoscale*. – 2015. - №7. – p.10294–10329.
2. Inam, F. and Luhyna, N. Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites. A Review on Recent Developments // In proceeding of 2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications. - Wrexham, UK, 2012. – p. 80-86.
3. Moosa A.A., Ramazani A. S. A., Ibrahim M.N. Effects of Carbon-Nanotubes on the Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Nanocomposites / *International Journal of Current Engineering and Technology*. – 2015. - №5. – p.3253.
4. Muhammad Ismail A.H., Risby M.S., Ali A., Sapuan S.M., Hoque M.E. Flexural strength and fracture toughness of carbon Nanotubes (CNTs) reinforced epoxy composites // In Proceedings of Seventh TheIIER International Conference. - Singapore, 2015. – p.44-48.
5. Mohamed I., Saleh N. J., Mohmoud L. H. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Carbon Nanotubes Composite / *College of Engineering Journal (NUCEJ)*. – 2015. - №1. – p84-90.
6. Uzunpinar C., Mosiewicki M.A., Auad M.L. Effect of SWCNT Dispersion on Epoxy Nanocomposite Properties / *Polymer Composites*. – 2012. - №33. – p.582-588.
7. Gkikas G, Barkoula NM, Paipetis AS. Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy / *Composites, Part B*. – 2012. - №43. – p.2697.
8. Fan-Long Jin, Soo-Jin Park: Recent Advances in Carbon-Nanotube-Based Epoxy Composites – Review / *Carbon Letters*. – 2013. - №1. – p.1-13.
9. Francisco W., Vargas Ferreira F., Vargas Ferreira E., de Simone Cividanes L. Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotube and Mechanical Property of Epoxy-Based Nanocomposite / *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2015. - №3. – p.289-293.
10. Aravand M., Lomov S. V., Verpoest I., Gorbatikh L. Evolution of carbon nanotube dispersion in preparation of epoxy-based composites: From a masterbatch to a nanocomposite / *Express Polymer Letters*. – 2014. - №8. – p. 596-608.
11. Poetschke P., Fornes T.D., Paul D.R. Rheological behavior of multi-walled carbon nanotube/polycarbonate composites / *Polymer*. – 2002. - №43. – p.3247.
12. Du F., Scogna R.C., Zhou W., Brand S., Fischer J.E., Winey K.I. Nanotube networks in polymer nanocomposites: Rheology and electrical conductivity / *Macromolecules*. – 2004. - №37. – p.9048.
13. Kinloch I.A., Roberts S.A., Windle A.H. A rheological study of concentrated aqueous nanotube dispersions / *Polymer*. – 2002. - №43. – p.7483.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ТИТАНАТА БАРИЯ

**В.М. Аль Мандалави, Т.Н. Короткова, А.И. Дунаев, М.А. Каширин, А.В. Калгин,
Н.А. Емельянов, Л.Н. Коротков**

В интервале температур 20 – 200 °С изучены электрическая проводимость (σ), линейные и нелинейные диэлектрические свойства наноструктурированного титаната бария со средним размером гранул около 120 нм. Наблюдаемая дисперсия диэлектрического отклика и диэлектрическая нелинейность в сегнетоэлектрической фазе материала преимущественно обусловлены доменным механизмом. Установлено, что аномальный термический гистерезис диэлектрической проницаемости, наблюдаемый при циклическом изменении температуры в области Кюри (T_C), вызван взаимодействием межфазных и доменных границ с дефектами кристаллической решетки. Результаты исследования электропроводности на постоянном токе показали, что перенос заряда преимущественно осуществляется через «объем» гранул. Значительный вклад в σ на переменном токе дают токи смещения, связанные с движением доменных границ и поляризацией Максвелла - Вагнера, обусловленной предположительно миграцией носителей заряда по зернограничному пространству. Изучены при комнатной температуре зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля для наноструктурированного и объемного образцов $BaTiO_3$. Установлено, что наноструктурированный титанат бария демонстрирует одновременно диамагнитные и ферромагнитные свойства. Его отжиг в атмосфере водорода привел к существенному повышению спонтанной намагниченности ($M_s \approx 0,04 \text{ Ам}^2/\text{кг}$) и ослаблению диамагнитного отклика. Полученные результаты говорят в пользу того, что вакансии атомов кислорода, присутствующие на границах зерен, ответственны за электронные состояния, продуцирующие ферромагнитный и диамагнитные отклики

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, ферромагнетик, наноструктурированный материал, электрические свойства, диэлектрические свойства, магнитные свойства

Введение

Современные достижения в области получения наноструктурированных сегнетоэлектриков, обладающих отличными от объемных структур свойствами, позволили активно применять их в различных приборах и устройствах электроники и техники СВЧ [1,2]: конденсаторах для динамических активных запоминающих устройств и устройств хранения энергии, подзатворных диэлектриках полевых транзисторов, электрокалорических устройствах охлаждения, фазовращателях, метаматериалах оптического и СВЧ диапазонов частот.

Одним из наиболее востребованных сегнетоэлектрических наноматериалов является титанат бария ($BaTiO_3$). К примеру, композитные материалы на основе наночастиц титаната бария в полимерной

матрице являются перспективными материалами для создания конденсаторов, поскольку одновременно обладают высокими значениями диэлектрической проницаемости и напряжения пробоя, а также хорошими механическими свойствами.

Наряду с уникальными электрофизическими свойствами, присущими наноструктурированному $BaTiO_3$, недавно было обнаружено, что наночастицы этого соединения обладают свойствами, совершенно не типичными для его объемного состояния. Экспериментально было показано [3-5], что ультрадисперсный титанат бария является ферромагнетиком несмотря на то, что в его составе отсутствуют, так называемые, «магнитные атомы».

Предполагается, что магнетизм является универсальным свойством наночастиц, связанным с высокой концентрацией дефектов на их поверхности, создающих электронные состояния, обладающие нескомпенсированным магнитным моментом [3]. Однако природа этого явления к настоящему времени слабо изучена.

Значительное влияние на свойства наночастиц сегнетоэлектрических материалов оказывают их геометрические размеры, форма, дефекты кристаллической решетки и многие другие факторы, существенно зависящие от технологии получения материала.

Таким образом, исследование физических свойств нанокристаллических сегнетоэлектриков и влияния на них технологических факторов представляет актуальную физическую и материаловедческую задачу.

Аль Мандалави Висам Мувафак – ВГТУ, аспирант, e-mail: wisamaljawagi@yahoo.com

Короткова Татьяна Николаевна – ВИ МВД России, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: tn_korotkova@mail.ru

Дунаев Александр Игоревич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: l_korotkov@mail.ru

Каширин Максим Александрович – ВГТУ, инженер-исследователь, e-mail: mnitro@yandex.ru

Калгин Александр Владимирович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kalgin_alexandr@mail.ru

Емельянов Никита Александрович – КГУ, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, e-mail: nikitaemelianov1988@gmail.com

Коротков Леонид Николаевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: l_korotkov@mail.ru

Цель настоящей работы заключается в получении совокупности экспериментальных данных о диэлектрических, электрических и магнитных свойствах наноструктурированной керамики титаната бария.

Образцы и методика эксперимента

Для проведения эксперимента использовали ультрадисперсный порошок титаната бария, произведенный фирмой «Sigma-Aldrich». Исходный материал имел средние размеры частиц около 80 нм и обладал при комнатной температуре кубической решеткой перовскита. Из порошка были спрессованы образцы в виде дисков с диаметром 10 и толщиной 1 мм. Образцы подвергались термическому отжигу при температуре 1000 °С в течение 5 часов и 1200 °С в течение 1 часа.

Анализ рентгеновской дифрактограммы, представленной на рис. 1, (Cu K α излучение), показал, что в образце, прошедшем термообработку при 1000 °С, произошло образование тетрагональной фазы титаната бария.

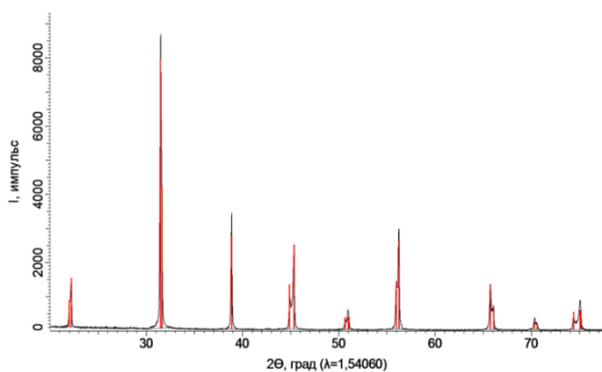


Рис. 1. Рентгенограмма образца BaTiO $_3$, подвергнутого отжигу при 1000 °С

Поверхность образца была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа. Ее вид показан на рис. 2.

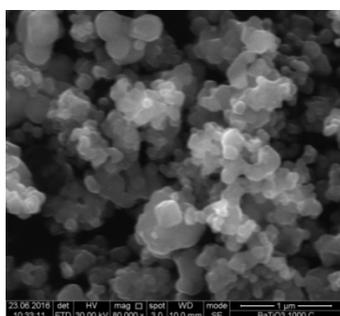


Рис. 2. Изображение поверхности экспериментального образца BaTiO $_3$

Можно видеть, что полученный материал сформирован из частиц диаметром $D \approx 80 - 300$ нм, при этом средний размер зерна оценивается величиной $D \approx 120$ нм. При этом средний размер кристаллитов, найденный из анализа рентгеновской ди-

фрактограммы с использованием метода Дебая – Шеррера составляет ≈ 80 нм.

Эксперименты по изучению диэлектрических и электрических свойств проводили в ходе нагрева/охлаждения образца на частотах (f) 25 - 500000 Гц при амплитуде измерительного поля 1 В с помощью измерителя иммитанса E7-20. Исследования проводили в присутствии электрического смещающего поля E_{\pm} , которое в зависимости от задач эксперимента изменялось в пределах 0 – 6,5 кВ/см.

Тот же измеритель иммитанса был применен для измерения электропроводности (σ) на переменном токе. Измерения σ на постоянном токе осуществляли с применением тераомметра E6-13A.

Зависимости намагниченности материала от напряженности магнитного поля были получены с использованием вибрационного магнетометра в полях напряженностью до ± 10000 Э.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Диэлектрические свойства

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости исследуемого материала показаны на рис. 3.

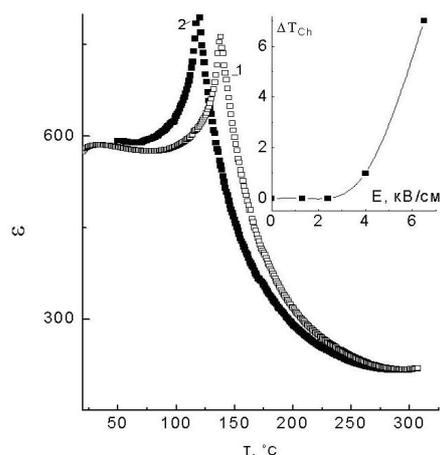


Рис. 3. Зависимости $\epsilon(T)$, наблюдаемые на частоте 10 кГц в ходе нагрева (1) и охлаждения (2) образца BaTiO $_3$, подвергнутого термическому отжигу при температуре 1000 °С в течение 5 часов
На вставке – зависимость $\Delta T_{Ch}(E_{\pm})$

Данные зависимости являются не монотонными и характеризуются отчетливым максимумом в окрестностях температуры Кюри $T_C \approx 120$ °С, свидетельствующем о сегнетоэлектрическом фазовом переходе.

Выше температуры Кюри зависимость $\epsilon(T)$ следует закону Кюри – Вейсса [6]:

$$\epsilon = \epsilon_{01} + C_{CW}/(T-\theta), \quad (1)$$

где ϵ_{01} – независимая от температуры составляющая диэлектрической проницаемости, C_{CW} – постоянная,

а θ – температура Кюри-Вейсса. Наилучшее качество аппроксимации зависимостей $\varepsilon^{-1}(T)$ было достигнуто при следующих значениях параметров: $C_{CW} \approx 21370$; $\theta \approx 98$ °С и $\varepsilon_{01} \approx 85$. Хорошая аппроксимация экспериментальных данных законом Кюри – Вейсса проиллюстрирована на рис. 4.

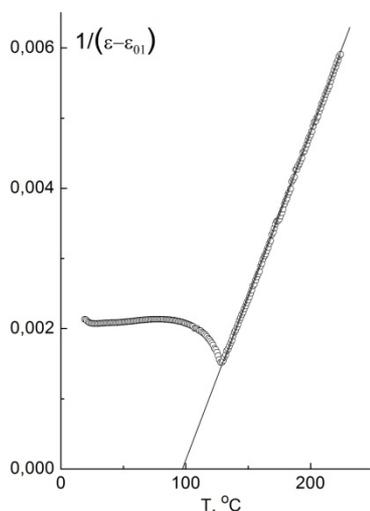


Рис. 4. Температурная зависимость $1/(\varepsilon-\varepsilon_{01})$, полученная в ходе нагрева. Сплошной линией показана аппроксимация экспериментальных данных законом (1)

Полученное значение C_{CW} для исследуемого материала существенно ниже, чем в объемном BaTiO_3 , где $C_{CW} \approx 142000$ К [6].

Стоит заметить, что пики ε , регистрируемые при нагреве и охлаждении образца, имеют различные позиции. Пик при нагреве соответствует температуре $T_{Ch} \approx 138$ °С, а при охлаждении – $T_{Cc} \approx 119$ °С. Таким образом, можно констатировать, что фазовый переход в данном материале является переходом первого рода, при этом ширина термического гистерезиса $\Delta T_C \approx 19$ °С. Эта величина существенно превышает ΔT_C в каноническом титанате бария. Можно предположить, что наблюдаемая в эксперименте аномально большая величина ΔT_C обусловлена взаимодействием межфазных границ с дефектами типа «случайное поле» подобно тому, например, как это имеет место в случае сегнетоэлектрических кристаллов с несоизмерной фазой [7 - 9].

О заметном влиянии внутренних электрических полей на сегнетоэлектрический фазовый переход в нанокристаллическом BaTiO_3 говорит вид зависимости смещения температуры T_{Ch} от напряженности приложенного к образцу электрического поля $E_=($ вставка к рис. 3). Полученная кривая $\Delta T_{Ch}(E_)=T_{Ch}(E_)-T_{Ch}(E_=0)$ заметно отличается от формы аналогичной зависимости, наблюдаемой для обычной керамики титаната бария, где зависимость $T_{Ch}(E_)$ является линейной в диапазоне полей $E_$, напряженность которых не превышает критическое значение [6]:

$$\Delta T_C = T_C(E_)= - T_C(E_=0) = A E_ \quad (2)$$

где $A \approx 1,4$ К/кВ.

Наблюдаемая в эксперименте форма зависимости $\Delta T_{Ch}(E_)$ характерна для сегнетоэлектриков с высокой концентрацией дефектов типа «случайное поле» [10, 11]. В окрестностях T_C полярные микрообласти находятся под действием случайных полей, обусловленных дефектами решетки. В случае, когда поле $E_$ меньше некоторого порогового значения, соответствующего эффективной напряженности внутреннего случайного электрического поля, смещения температуры T_{Ch} под действием поля $E_$ не происходит. Когда поле $E_$ превышает это пороговое значение, начинается быстрое смещение T_{Ch} , что и наблюдается в нашем эксперименте.

Результаты исследования влияния электрического смещающего поля $E_$ на диэлектрические свойства материала проиллюстрированы на рис. 5.

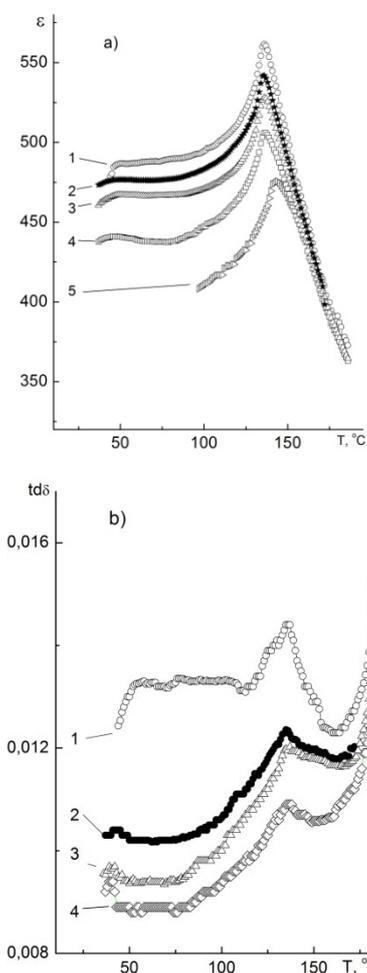


Рис. 5. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б), полученные на частоте 10 кГц в ходе нагрева при значениях электрического смещающего поля $E_ = 0$ (1), 1,3 (2), 2,4 (3), 4,0 (4) и 6,5 кВ/см (5).

Снижение ε в сегнетоэлектрической фазе уместно связывать с уменьшением вклада доменного механизма в диэлектрический отклик. В параэлектрической фазе диэлектрическая нелинейность в канонических сегнетоэлектриках вызвана решеточным ангармонизмом, который значительно

ослабевает по мере удаления от температуры фазового равновесия [6].

Изменение ϵ под действием поля E_* иллюстрируют температурные зависимости нелинейной диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ (рис. 6), которые определялись следующим образом:

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dE_*} \approx \frac{1}{\epsilon(E_* = 0)} \cdot [\epsilon(E_*) - \epsilon(E_* = 0)]. \quad (3)$$

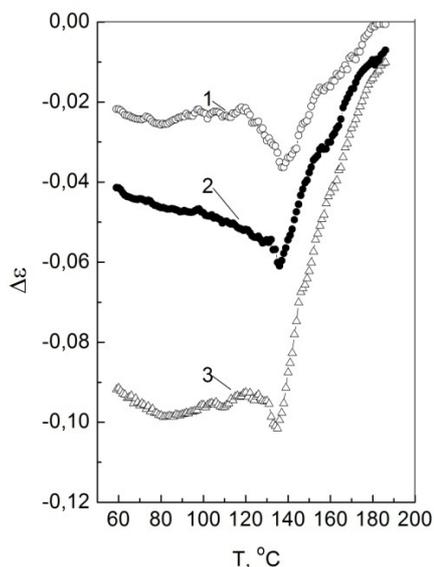


Рис. 6. Температурные зависимости $\Delta\epsilon$, полученные при следующих значениях смещающего поля: $E_* = 1,3$ (1), 2,4 (2) и 4,0 кВ/см (4)

Нетрудно убедиться, что с повышением температуры $\Delta\epsilon$ возрастает по абсолютной величине, достигая максимума в точке Кюри. Выше T_C абсолютное значение нелинейного отклика быстро убывает, приближаясь к нулю в окрестностях 200 °С.

Значительное снижение величины ϵ в пределах сегнетоэлектрической фазы однозначно свидетельствует о том, что в наноструктурированном титанате бария ниже температуры Кюри образуется доменная структура, дающая доминирующий вклад в линейный и нелинейный диэлектрический отклик и диэлектрические потери ($\text{tg}\delta$) в полярной фазе (рис. 5).

Выше температуры Кюри диэлектрическая нелинейность быстро убывает. Вместе с тем нелинейный отклик отчетливо проявляется и при температурах, лежащих приблизительно на 50 °С выше T_C . Столь высокая нелинейность в параэлектрической фазе на значительном удалении от T_C не может быть объяснена в рамках простой феноменологической теории сегнетоэлектрических фазовых переходов [6]. Можно, однако, предположить, что определенный вклад в $\Delta\epsilon$ здесь дают сегнетоэлектрические домены, «затянутые» в параэлектрическую фазу вследствие сильного взаимодействия их границ с дефектами кристаллической решетки.

Стабилизацией полярных областей дефектами можно на качественном уровне объяснить существенное завышение температуры Кюри, регистрируемое в ходе нагрева образца ($T_{Ch} \approx 138$ °С) по

сравнению с $T_{Ch} \approx 120$ °С, наблюдаемой в аналогичных условиях для керамического титаната бария. Наряду с этим температура перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу ($T_{Cc} \approx 119$ °С) исследуемого образца практически совпадает с известным значением температуры Кюри в ВаTiO₃ [6].

Предположение о «затягивание областей полярной фазы» в параэлектрическую фазу согласуется с данными, изложенными в работе [12], согласно которым в некоторых сильно дефектированных образцах ВаTiO₃ полярное состояние полностью распадалось только при нагреве до ≈ 500 °С.

Обсудим теперь дисперсию диэлектрического отклика в исследуемом материале. На рис. 7 видно, что ϵ и $\text{tg}\delta$ существенно зависят от частоты измерительного поля f во всем интервале температур, доступном в эксперименте.

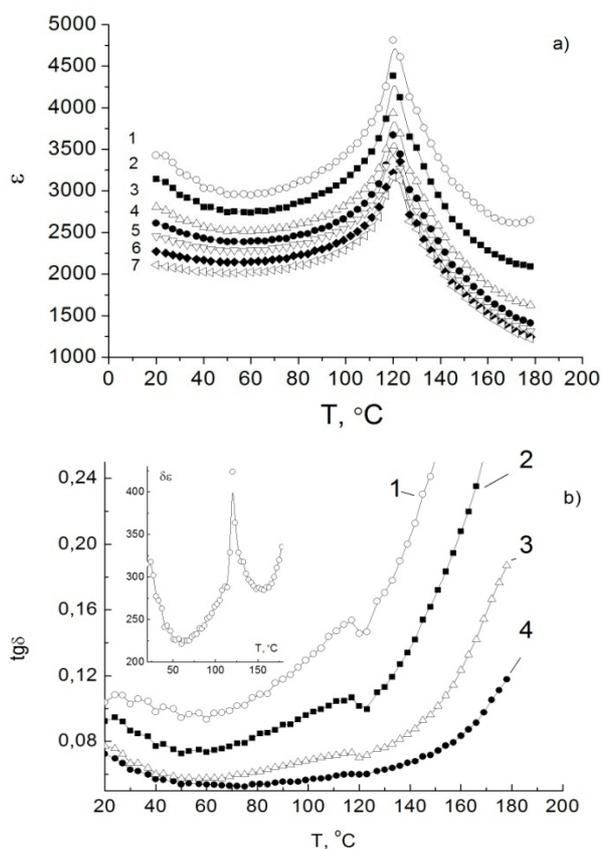


Рис. 7. Температурные зависимости ϵ (панель а) и $\text{tg}\delta$ (панель б), полученные на частотах 25 (1), 120 (2), 1000 (3), 5000 Гц (4), 20 (5) 100 (6) и 500 кГц (7)
На вставке – температурная зависимость глубины дисперсии $\Delta\epsilon = \epsilon(25 \text{ Гц}) - \epsilon(1 \text{ МГц})$

Можно увидеть (рис. 7), что заметное возрастание дисперсии ϵ происходит и при охлаждении образца ниже ≈ 50 °С. Это связано с приближением температуры образца к температуре структурного фазового перехода между тетрагональной и ромбической фазами. Вблизи фазового перехода подвижность доменных границ возрастает, что и ведет к увеличению ϵ , $\Delta\epsilon$ и $\text{tg}\delta$. (Переход из тетрагональной в ромбическую фазу, который в керамическом Ва-

TiO₃ реализуется около 0 °С [6], в условиях нашего эксперимента не наблюдался.)

Выше T_c также происходит рост δε. Однако в данном случае он обусловлен увеличением электропроводности материала (σ).

Электропроводность

Надо заметить, что вопрос о механизмах проводимости в наноструктурированном титанате бария представляет отдельный интерес. Представляется важным выяснить, осуществляется ли перенос заряда преимущественно по существенно развитой в наноматериалах поверхности частиц, либо доминирует так называемая «объемная» проводимость?

Температурная зависимость σ, полученная на постоянном токе (рис. 8) имеет вид, характерный для керамического титаната бария [15] и может быть описана суммой двух термоактивационных процессов:

$$\sigma(T) = \begin{cases} \sigma_{01} \exp\left(\frac{U_1}{kT}\right) + \sigma_1 & \text{при } T < T_c \\ \sigma_{02} \exp\left(\frac{U_2}{kT}\right) + \sigma_2 & \text{при } T > T_c \end{cases} \quad (4)$$

где σ₀₁ и σ₀₂ – параметры, U₁ и U₂ – значения энергии активации σ в сегнетоэлектрической и параэлектрической фазах соответственно, σ₁ и σ₂ – составляющие электропроводности, обусловленные действием других механизмов переноса заряда в сегнетоэлектрической и параэлектрической фазах соответственно, k – постоянная Больцмана.

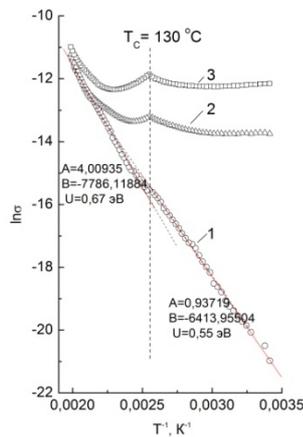


Рис. 8. Температурные зависимости электропроводности, полученные на постоянном (1) и переменном токе частотой 2 (2) и 10 кГц (3)

Наилучшая аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (2) было достигнуто при следующих значениях параметров: U₁ ≈ 0,55 эВ, σ₀₁ ≈ 55 Ом⁻¹ и U₂ = 0,67 эВ, σ₀₂ ≈ 1,1 Ом⁻¹.

Сравнение найденных экспериментальным путем значений энергии активации электропроводности U₁ и U₂ с известными литературными данными для керамического BaTiO₃ [15] выявило их прибли-

зительное соответствие. Наблюдаемый в окрестностях T_c излом на зависимости lnσ(T⁻¹), очевидно, является следствием структурного фазового перехода внутри наночастиц.

Совокупность полученных результатов однозначно свидетельствует о том, что в наноструктурированном титанате бария перенос заряда преимущественно осуществляется через «объем» гранул, а не по их поверхности.

Электропроводность исследуемого материала на переменном токе (σ_~) существенно выше проводимости σ. Особенно это заметно для интервала температур, соответствующего сегнетоэлектрической фазе (рис. 8). Очевидно, что здесь заметный вклад в σ_~ дают токи смещения, обусловленные движением доменных границ.

Действительно, под действием поля E_~, действие которого ведет к снижению числа доменных границ, происходит уменьшение проводимости σ_~ (рис. 9).

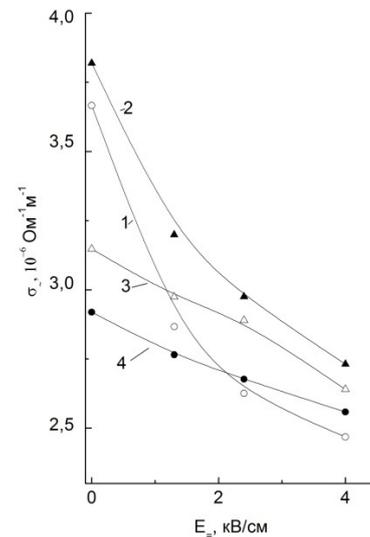


Рис. 9. Зависимости электропроводности σ_~ на частоте 10 кГц от напряженности смещающего поля, полученные при температурах 100 (1), 120 (2) 160 (3) и 170 °С (4)

Причем наиболее заметное уменьшение σ_~ наблюдается в окрестностях температуры Кюри, где доменная структура наиболее подвижна [6]. Можно было бы ожидать, что выше T_c влияние поля E_~ на электропроводность будет отсутствовать. Однако эксперимент показывает, что, несмотря на заметное ослабление σ_~ в параэлектрической фазе, она все же наблюдается даже при температурах, на 50 °С превышающих T_c.

Проанализируем частотные зависимости электрической проводимости. Согласно [16] выражение для частотно зависимой проводимости имеет универсальный вид:

$$\sigma_f = \sigma + \sigma_{\sim} = \sigma + Af^{\nu}, \quad (5)$$

где A – коэффициент, имеющий размерность проводимости, ν – параметр, определяемый механизмом

переноса заряда. (В случае прыжкового механизма, характеризующегося широким спектром потенциальных барьеров ΔE , при $\Delta E \gg kT$ параметр $\nu \rightarrow 1$, а в случае частотно независимой проводимости $\nu \rightarrow 0$).

Действительно, полученная экспериментально зависимость $\sigma_{\sim}(f)$ следует соотношению (4), что подтверждается линейной зависимостью между $\ln \sigma$ и $\ln f$, показанной на вставке к рис. 10.

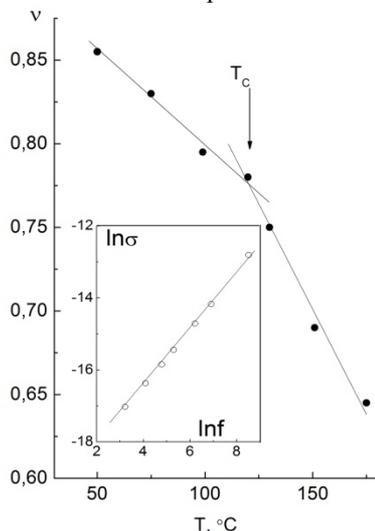


Рис. 10. Температурная зависимость параметра ν .
На вставке – зависимость $\ln \sigma$ от $\ln f$

Тангенс угла наклона прямой численно равен значению параметра ν , температурная зависимость которого изображена на рис. 10.

Ниже температуры Кюри значения параметра ν находятся в пределах 0,77 – 0,85, что согласно [16] указывает на прыжковый механизм проводимости, который характеризуется широким спектром потенциальных барьеров. Существование такого спектра барьеров естественно ожидать в случае материала с высокой концентрацией дефектов, каковым, очевидно, и является объект исследования.

С повышением температуры параметр ν убывает, что уместно связать с «ослаблением» неравенства $\Delta E \gg kT$.

Наряду с доменным механизмом, дающим значительный вклад в σ_{\sim} в сегнетоэлектрической фазе, представляется очевидным наличие поляризации Максвелла - Вагнера, обусловленного миграцией носителей заряда. На это указывает значительная дисперсия электропроводности при температурах, лежащих значительно выше T_C , где сегнетоэлектрические домены отсутствуют.

Естественно предположить, что преимущественно миграция носителей заряда происходит по зернограничному пространству, характеризующемуся повышенной концентрацией дефектов.

Магнитные свойства

Анализ литературных источников показывает, что многие немагнитные в обычном состоянии материалы в

наноструктурированном состоянии становятся слабыми ферромагнетиками [3-5].

Не является исключением и титанат бария, имеющий электронную структуру $Ba^{2+}(6s^0)$, $Ti^{4+}(3d^0)$, $O^{2-}(2s^2 2p^6)$, которая характеризуется нулевым магнитным моментом. Поэтому объемный $BaTiO_3$ является диамагнетиком. Это подтверждается результатами исследования зависимостей намагниченности (M) от напряженности магнитного поля (H) (рис. 11, кривая 1).

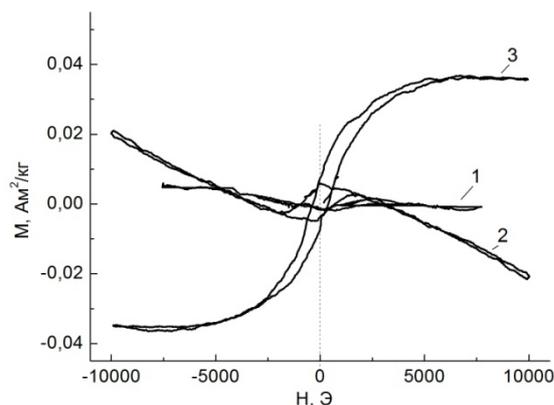


Рис. 11. Петли магнитного гистерезиса для объемного (1) и наноструктурированного (2) $BaTiO_3$. Кривая (3) получена для наноструктурированного $BaTiO_3$ после его отжига в атмосфере водорода

Следует заметить, что диамагнитный отклик в наноструктурированном $BaTiO_3$ существенно выше, чем в объемном. Вероятно, это является следствием высокой концентрации различных типов дефектов кристаллической решетки, часть из которых дает вклад в диамагнитный отклик, а часть – приводит к ферромагнетизму.

В работах [3, 17] высказывалось мнение о том, что ответственными за появление магнитного взаимодействия в $BaTiO_3$ являются вакансии атомов кислорода, локализованные преимущественно на поверхности наночастиц. В титанате бария кислородные вакансии могут быть созданы путем отжига в атмосфере водорода [15]. Поэтому можно ожидать, что термический отжиг образцов объемного и наноструктурированного титаната бария, проведенный в нашем эксперименте в атмосфере водорода в течение 2 часов при температуре 700 °C приведет к видимому изменению магнитных свойств этих материалов.

Действительно, исследования петель магнитного гистерезиса, проведенные после отжига исследуемых материалов в водороде, выявили заметное увеличение спонтанной намагниченности наноструктурированного образца ($M_s \approx 0,04 \text{ Am}^2/\text{kg}$), и ослабление диамагнитного отклика (рис. 11, кривая 3). Заметных изменений зависимости $M(H)$ для объемного материала в условиях эксперимента выявлено не было, поэтому эта зависимость не приведена на рисунке.

Таким образом, результаты исследования петель магнитного гистерезиса показали, что наноструктурированный титанат бария является ферромагнетиком и диамагнетиком одновременно. При этом различные дефекты на поверхности наночастиц преимущественно ответственны за электронные состояния, обуславливающие

ющие, как ферромагнитный, так и диамагнитный отклики. Отжиг наноструктурированного образца BaTiO₃ приводит к заметному возрастанию спонтанной намагниченности и ослаблению диамагнитной восприимчивости.

Заклучение

Результаты проведенных исследований наноструктурированного титаната бария позволили установить, что данный материал является мультиферроиком, сочетающим в себе одновременно свойства сегнетоэлектрика и ферромагнетика.

Совокупность экспериментальных данных показывает, что основное влияние на его физические свойства оказывают дефекты решетки, локализованные как на поверхности, так и в объеме гранул.

Взаимодействие дефектов типа «случайное поле» с межфазными границами приводит к аномально широкому гистерезису диэлектрической проницаемости при циклическом изменении температуры в окрестностях T_C.

Наряду с этим дефекты формируют электронные состояния, обуславливающие значительный вклад токов смещения в перенос заряда на переменном токе. Проведенный анализ показал, что эти токи связаны как с движением доменных границ, так и поляризацией Максвелла - Вагнера, обусловленной, предположительно, миграцией носителей заряда по зернограничному пространству. Проводимость на переменном токе описывается в рамках прыжкового механизма, характеризующегося широким спектром потенциальных барьеров. Существование такого спектра барьеров естественно ожидать в случае материала с высокой концентрацией дефектов, каковым, очевидно, и является наноструктурированный BaTiO₃.

Вместе с тем исследования электропроводности на постоянном токе недвусмысленно показали, что сквозной перенос заряда преимущественно осуществляется через «объем» гранул, подобно случаю канонического BaTiO₃.

В ходе изучения нелинейной диэлектрической проницаемости неожиданно была обнаружена заметная нелинейность ϵ глубоко в параэлектрической фазе при температурах, более чем на ≈ 50 °C превышающих T_C. Можно предположить, что наблюдаемая здесь нелинейность диэлектрического отклика связана с наличием сегнетоэлектрических доменов «затянутых» в параэлектрическую фазу, благодаря их взаимодействию с заряженными дефектами решетки. Наряду с этим, очевидно, требуется рассмотрение и других возможных механизмов диэлектрической нелинейности, что выходит за рамки данной работы.

Анализ зависимостей намагниченности от напряженности магнитного поля для наноструктурированного и объемного образцов BaTiO₃ показал, что наноструктурированный титанат бария демонстрирует одновременно диамагнитные и ферромагнитные свойства. Его отжиг в атмосфере водорода привел к существенному повышению спонтанной

намагниченности ($M_s \approx 0,04$ Ам²/кг) и ослаблению диамагнитного отклика. Полученные результаты говорят в пользу того, что вакансии атомов кислорода, присутствующие на границах зерен, ответственны за электронные состояния, продуцирующие ферромагнитный и диамагнитные отклики.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00583).

Литература

1. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer [Text] / P. Kim, N. M. Doss, J. P. Tillotson, P. J. Hotchkiss, M.-J. Pan, S. R. Marder, J. Li, J. P. Calame, J. W. Perry // ACS Nano. – 2009. – Vol. 3. – No. 9. – P. 2581 – 2592.
2. All-dielectric invisibility cloaks made of BaTiO₃-loaded polyurethane foam [Text] / D. Bao, K. Z. Rajab, Y. Hao, E. Kallos, W. Tang, C. Argyropoulos, Y. Piao, S. Yang // New Journal of Physics. – 2011. – Vol. 13. – P. 103023 [13 pages].
3. Sundaresan A. Ferromagnetism as a universal feature of inorganic nanoparticles [Text] / A. Sundaresan, C. N. R. Rao // Nano Today. – 2009. – Vol. 4. – No. 1. – P. 96 – 106.
4. Origin of ferromagnetism in BaTiO₃ nanoparticles prepared by mechanical milling [Text] / T.-L. Phan, P. Zhang, D. S. Yang, T. D. Thanh, D. A. Tuan, S. C. Yu // Journal of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113. – P. 17E305 [3 pages].
5. UV-irradiation-enhanced ferromagnetism in BaTiO₃ [Text] / Sh. Qin, D. Liu, Zh. Zuo, Y. Sang, X. Zhang, F. Zheng, H. Liu, X.-G. Xu // J. Phys. Chem. Lett. – 2010. – Vol. 1. – P. 238 – 241.
6. Иона Ф. Сегнетоэлектрические кристаллы [Текст] / Ф. Иона, Д. Ширане. – М.: Мир, 1965. – 556 с.
7. Hamano K. Critical phenomena and anomalous thermal hysteresis accompanying the normal-incommensurate-commensurate phase transitions in Rb₂ZnCl₄ [Text] / K. Hamano, Y. Ikeda, T. Fujimoto, K. Ema, Sh. Hirotsu // J. Phys. Soc. Jpn. – 1980. – Vol. 49. – No. 6. – P. 2278 – 2286.
8. McMillan W. L. Landau theory of charge-density waves in transition metal dichalcogenides [Text] / W. L. McMillan // Phys. Rev. B. – 1975. – Vol. 12. – No. 4. – P. 1187 – 1196.
9. Mashiyama H. X-ray study on the thermal hysteresis of the modulation wavevector in (Rb_{1-x}K_x)₂ZnCl₄ [Text] / H. Mashiyama, S. Tanisaki, K. Hamano // J. Phys. Soc. Jap. – 1982. – V. 51. – No. 8. – P. 2538 – 2544.
10. Korotkov L. N. Dielectric nonlinearity of K_{1-x}(NH₄)H₂PO₄ mixed crystals in ferro- and mixed ferro-glassy states [Text] / L. N. Korotkov // Phys. Stat. Sol. (b). – 2000. – Vol. 222. – No. 2. – P. R3 – R5.
11. Дороговцев С. Н. Влияние внешнего поля на температуру максимума восприимчивости в системе с размытым фазовым переходом [Текст] / С. Н. Дороговцев // ФТТ. – 1982. – Т. 24. – Вып. 6. – С. 1661 – 1664.
12. Jaffe B. Piezoelectric ceramics [Text] / B. Jaffe, W. R. Cook, H. Yaffe. – London and New York: Academic Press, 1971. – 317 p.
13. Dielectric losses in submicrometer barium titanate near the Curie temperature [Text] / L. N. Korotkov, W. M. Al Mandalawi, T. N. Korotkova, N. A. Emelianov, E. A. Zhmachenko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2016. – Vol. 80. – No. 9. – P. 1074 – 1076.
14. Гриднев С. А. Механизм диэлектрических потерь в монокристаллах BaTiO₃ при температурах сегне-

тоэлектрического фазового превращения [Текст] / С. А. Гриднев, Б. М. Даринский, В. С. Постников // Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. – Каунас: КПИ, 1974. – С. 244 – 248.

15. Гуревич В. М. Электропроводность сегнетоэлектриков [Текст] / В. М. Гуревич. – М.: Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, 1969. – 384 с.

16. Elliott S. R. A.c. conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors [Text] / S. R. Elliott // *Advances in Physics*. – 1987. – Vol. 36. – No. 2. – P. 135 – 218.

17. Multiferroic properties of nanocrystalline BaTiO₃ [Text] / R. V. K. Mangalam, N. Ray, U. V. Waghmare, A. Sundaresan, C. N. R. Rao // *Solid State Communications*. – 2009. – Vol. 149. – P. 1 – 5.

Воронежский государственный технический университет
Курский государственный университет
Воронежский институт МВД России

ELECTRICAL, DIELECTRICAL, AND MAGNETIC PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED BARIUM TITANATE

W.M. Al Mandalawi, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: wisamaljawari@yahoo.com

T.N. Korotkova, Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Voronezh Institute of RF Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russian Federation, e-mail: tn_korotkova@mail.ru

A.I. Dunaev, Candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: l_korotkov@mail.ru

M.A. Kashirin, Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mnitro@yandex.ru

A.V. Kalgin, Candidate of physical and mathematical sciences, Assistant professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalgin_alexandr@mail.ru

N.A. Emelianov, Candidate of physical and mathematical sciences, researcher, Kursk State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikitaemelianov1988@gmail.com

L.N. Korotkov, Doctor of physical and mathematical sciences, Full professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: l_korotkov@mail.ru

Electrical conductivity, linear and nonlinear dielectric properties of nanostructured barium titanate with average sizes of granules near 120 nm were studied within temperature range 20 – 200 °C. Observed dispersion of dielectric permittivity (ϵ) and dielectric nonlinearity of the material under study within the ferroelectric phase are caused by the domain mechanism mainly. It was found that anomalous hysteresis of ϵ observed at cycle temperature variation in the vicinity of Curie temperature (T_C) is due to interaction of interphasic boundaries with lattice defects. Studies of d.c. electrical conductivity revealed that charge transport is realized mainly through the granule volume. Considerable contribution to a.c. conductivity gives displacement currents which are caused by both the domain wall motion and the Maxwell–Wagner polarization. The last one supposedly due to a migration of charge carries in granule interfaces. Dependences of magnetization on magnetic field strength were studied for both the nanostructured and the bulk ferroelectric BaTiO₃. It was found that nanostructured barium titanate demonstrates ferromagnetic and diamagnetic properties simultaneously. The annealing of nanostructured BaTiO₃ in H₂ atmosphere under experimental conditions leads to a significant increase of the spontaneous magnetization and decrease of the diamagnetic response. Analysis of experimental results shows that defects in grains surfaces of the nanostructured BaTiO₃ (probably oxygen vacancies) are mainly responsible for electron states, which produce ferromagnetic and diamagnetic responses

Key words: ferroelectric, ferromagnetic, nanostructured material, electrical properties, dielectric properties, magnetic properties

References

1. P. Kim, N. M. Doss, J. P. Tillotson, P. J. Hotchkiss, M.-J. Pan, S. R. Marder, J. Li, J. P. Calame, J. W. Perry. High energy density nanocomposites based on surface-modified BaTiO₃ and a ferroelectric polymer. *ACS Nano*. – 2009. – Vol. 3. – No. 9. – P. 2581 – 2592.

2. D. Bao, K. Z. Rajab, Y. Hao, E. Kallos, W. Tang, C. Argyropoulos, Y. Piao, S. Yang. All-dielectric invisibility cloaks made of BaTiO₃-loaded polyurethane foam. *New Journal of Physics*. – 2011. – Vol. 13. – P. 103023 [13 pages].
3. A. Sundaresan, C. N. R. Rao. Ferromagnetism as a universal feature of inorganic nanoparticles. *Nano Today*. – 2009. – Vol. 4. – No. 1. – P. 96 – 106.
4. T.-L. Phan, P. Zhang, D. S. Yang, T. D. Thanh, D. A. Tuan, S. C. Yu. Origin of ferromagnetism in BaTiO₃ nanoparticles prepared by mechanical milling. *Journal of Applied Physics*. – 2013. – Vol. 113. – P. 17E305 [3 pages].
5. Sh. Qin, D. Liu, Zh. Zuo, Y. Sang, X. Zhang, F. Zheng, H. Liu, X.-G. Xu. UV-irradiation-enhanced ferromagnetism in BaTiO₃. *J. Phys. Chem. Lett.* – 2010. – Vol. 1. – P. 238 – 241.
6. Iona F., Shirane D. *Segnetoelektricheskie kristally* [Ferroelectric crystals]. Moskva, Mir, 1965. 556 p.
7. K. Hamano, Y. Ikeda, T. Fujimoto, K. Ema, Sh. Hirotsu. Critical phenomna and anomalous thermal hysteresis accompanying the normal-incommensurate-commensurate phase transitons in Rb₂ZnCl₄. *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1980. – Vol. 49. – No. 6. – P. 2278 – 2286.
8. W. L. McMillan. Landau theory of charge-density waves in transition metal dischalcogenides. *Phys. Rev. B*. – 1975. – Vol. 12. – No. 4. – P. 1187 – 1196.
9. H. Mashiyama, S. Tanisaki, K. Hamano. X-ray study on the thermal hysteresis of the modulation wavevector in (Rb_{1-x}K_x)₂ZnCl₄. *J. Phys. Soc. Jap.* – 1982. – V. 51. – No. 8. – P. 2538 – 2544.
10. L. N. Korotkov. Dielectric nonliarity of K_{1-x}(NH₄)H₂PO₄ mixed crystals in ferro- and mixed ferro-glassy states. *Phys. Stat. Sol. (b)*. – 2000. – Vol. 222. – No. 2. – P. R3 – R5.
11. S. N. Dorogovtsev. Vliyanie vneshnego polya na temperaturu maksimuma vospriimchivosti v sisteme s razmytym fazovym perekhodom [Influence of external field on temperature of susceptibility maximum in system with diffuse phase transition]. *Fizika tverdogo tela*. – 1982. – T. 24. – Vyp. 6. – P. 1661 – 1664.
12. Jaffe B., Cook W. R., Yaffe H. *Piezoelectric ceramics*. London and New York, Academic Press, 1971. 317 p.
13. L. N. Korotkov, W. M. Al Mandalawi, T. N. Korotkova, N. A. Emelianov, E. A. Zhmachenko. Dielectric losses in submicrometer barium titanate near the Curie temperature. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2016. – Vol. 80. – No. 9. – P. 1074 – 1076.
14. S. A. Gridnev, B. M. Darinsky, V. S. Postnikov – Mekhanizmy relaksatsionnykh yavleny v tvyordykh telakh. Mekhanizmy dielektricheskikh poter' v kristallakh BaTiO₃ pri temperaturakh segnetoelektricheskogo fazovogo prevrascheniya [Mechanism of dielectric losses in single crystals BaTiO₃ at temperatures of ferroelectric phase transition]. Kaunas, KPI, 1974. P. 244 – 248.
15. Gurevich V. M. *Elektroprovodnost' segnetoelektrikov* [Electrical conduction of ferroelectrics]. Moskva, Izdatel'stvo Komiteta standartov, mer i izmeritel'nykh priborov pri Sovete ministrov SSSR, 1969. 384 p.
16. S. R. Elliott. A.c. conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors. *Advances in Physics*. – 1987. – Vol. 36. – No. 2. – P. 135 – 218.
17. R. V. K. Mangalam, N. Ray, U. V. Waghmare, A. Sundaresan, C. N. R. Rao. Multiferroic properties of nanocrystalline BaTiO₃. *Solid State Communications*. – 2009. – Vol. 149. – P. 1 – 5.

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ CASE-СРЕДСТВ

М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева

Одной из задач системы сетевого управления является моделирование и оптимизация работы сети. Моделирование предполагает формирование допустимых вариантов состава компонентов сети. Компонентами локальной сети являются компьютеры и коммуникационное оборудование. Оптимизация заключается в анализе нагрузок, технических характеристик оборудования и его стоимости. Существующие специализированные программы моделирования работы сети не формируют альтернативные варианты построения сети. Данные программы не реализуют оптимизацию состава сети по технико-экономическим показателям. Моделирование и оптимизацию работы сети целесообразно осуществлять на основе специализированной системы поддержки принятия решения.

В данной статье предлагается структура специализированной системы поддержки принятия решения по составу компонентов локальной сети. Данная система включает стандартное специализированное CASE-средство для формирования вариантов оборудования сети, подсистему экспертной оценки вариантов и подсистему выбора оптимального варианта состава оборудования локальной сети. Программное CASE-средство формирует состав оборудования. Эксперты оценивают состав оборудования по следующим характеристикам: средняя загрузка сервера и рабочих станций, среднее время задержки на коммутационном оборудовании, средняя скорость передачи данных и т.д. Подсистема выбора оптимального варианта организации сети осуществляет оценку вариантов по стоимостным показателям.

Формирование множества альтернативных вариантов организации сети реализуется в рамках оптимизационных моделей. Первый вариант модели позволяет выбрать ограниченный набор альтернатив. Второй вариант моделей формирует альтернативы с учетом мнения экспертов. Эксперты назначают эксплуатационным характеристикам весовые коэффициенты важности. Выбираются варианты с высокими суммарными коэффициентами важности. Выбор оптимального варианта осуществляется по стоимостным показателям

Ключевые слова: состав оборудования, моделирование, оптимальный выбор, показатели оценки

Введение

В связи с интеграцией корпоративных сетей все более остро встает проблема управления распределенными гетерогенными сетями. Создание системы сетевого управления требует решения целого ряда задач:

- традиционные задачи сетевого управления, связанные с управлением конфигурацией сети, производительностью, безопасностью;
- управление распределенными приложениями, построенными на основе гетерогенных баз данных;
- мониторинг текущего состояния программно-аппаратного обеспечения организации;
- модернизация технического и программного обеспечения с учетом текущего состояния имеющихся программных средств и оборудования;
- моделирование и оптимизация работы сети на основе анализа нагрузок и технических характеристик оборудования.

Таким образом, одним из направлений повышения эффективности сетевого управления является выбор и конфигурирование оборудования на основе моделирования сети и сетевых нагрузок.

Моделирование сети и сетевых нагрузок

Основными компонентами аппаратного обеспечения вычислительной сети являются компьютеры, концентраторы (коммутаторы, маршрутизаторы), сетевые адаптеры, кабели [1]. Многообразие компьютеров и коммуникационного оборудования усложняют задачу выбора.

Ни один из имеющихся на рынке программного обеспечения продуктов не решает целиком ни одной из перечисленных выше задач.

Моделирование сетей обычно используют при создании новой сети или модернизации существующей.

Программные средства моделирования сети должны обеспечивать [2]:

- визуализацию топологии сети и распределение нагрузок по отдельным сегментам;
- возможность варьирования нагрузок в соответствии с требованиями проектировщика;
- отображение работы сети с выбранным оборудованием, топологией и трафиком;

Сергеев Михаил Юрьевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: mikesergeev@mail.ru
Сергеева Татьяна Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: sergeevati_vgtu@mail.ru

- формирование статистических показателей работы сети и отдельных ее компонентов;
- формирование вариантов построения сети с целью их последующего анализа.

Результаты моделирования используются при принятии решений по созданию или модернизации сетей с определенным составом оборудования, выбранной топологией и трафиками.

В настоящее время на рынке не существует ни одного универсального продукта, пригодного для полномасштабного моделирования работы сети и выбора оптимального варианта построения сети на базе множества сформированных альтернатив.

Система моделирования и оптимизации работы сети

Моделирование и оптимизацию работы сети целесообразно осуществлять на основе специализированной системы поддержки принятия решения. Данная система может состоять из следующих компонентов:

- специализированная программа моделирования работы сети, позволяющая формировать варианты компоновки элементов сети, отличающиеся оборудованием, топологией и трафиком;
- программа экспертной оценки сформированных вариантов компоновки элементов сети и формирования базы данных эксплуатационных и технико-экономических характеристик вариантов сети;
- программа выбора оптимального варианта построения сети.

В качестве специализированной программы моделирования работы сети можно использовать программу Net Cracker Professional.

Net Cracker Professional – система, которая представляет собой CASE-средство автоматизированного проектирования, моделирования и анализа компьютерных сетей.

Net Cracker позволяет провести эксперименты, результаты которых могут быть использованы для обоснования выбора типа сети, сред передачи, сетевых компонент оборудования и программно-математического обеспечения.

В состав программного обеспечения Net Cracker входит мощная база данных сетевых устройств ведущих производителей: рабочих станций, серверов, сред передачи, сетевых адаптеров, повторителей, мостов, коммутаторов, маршрутизаторов, используемых для различных типов сетей и сетевых технологий.

На первом этапе необходимо сформировать альтернативные варианты состава оборудования сети. Альтернативные варианты состава

компонентов сети формируются группой экспертов с применением программы Net Cracker. При выборе состава сети, топологии и трафика оцениваются:

- скорость передачи данных;
- средняя загрузка компонентов сети (сервера, рабочих станций, коммутаторов и т.д.);
- среднее время задержки на коммутаторе;
- предельные расстояния между узлами сети;
- число пользователей в сети;
- число получаемых сервисов.

Программа Net Cracker позволяет выбрать необходимое оборудование из базы данных и получить статистические характеристики работы сети и ее отдельных компонентов.

Каждый альтернативный вариант состава компонентов сети включает:

- компьютер-сервер определенного производителя;
- компьютеры – рабочие станции определенного производителя и их количество;
- коммутаторы (или аналогичное оборудование) определенного производителя и их количество;
- сетевые адаптеры определенного производителя и их количество;
- кабель и его количество;
- список трафиков для каждого компьютера.

Каждый альтернативный вариант компонентов сети может оцениваться по следующим эксплуатационным характеристикам:

- средняя загрузка сервера;
- средняя загрузка рабочей станции;
- среднее время задержки на коммутаторе;
- общая длина кабелей;
- средняя скорость передачи данных;
- общее количество компьютеров;
- общее количество различных трафиков.

Эти данные можно получить из программы Net Cracker.

Состав оборудования и статистические характеристики работы каждого варианта сети должны быть введены в базу данных с помощью программной системы, работающей с экспертами.

Исходное множество вариантов построения сети должно быть ограничено до альтернативного множества вариантов построения сети, допустимого по эксплуатационным характеристикам.

Постановка задачи

Формирование альтернативного множества вариантов построения сети может происходить либо в рамках задачи поиска одного или ограниченной группы вариантов, либо в рамках задачи выбора вариантов, имеющих, прежде всего, наиболее важные с точки зрения эксперта значения эксплуатационных характеристик.

Пусть $V = \{v_i (i=1, \dots, I)\}$ – исходное множество вариантов компонентов сети, сформированное экспертами. Каждому варианту компонентов сети поставлено в соответствие множество значений эксплуатационных характеристик $P_k (k=1, \dots, K)$. Множество V должно быть ограничено до V^* , которое является допустимым множеством вариантов компонентов сети, имеющих требуемые значения эксплуатационных характеристик $P_k; (k=1, \dots, K)$.

Сформируем матрицу $A = \{a_{ik}\}$, элементы которой определяются из следующих условий:

- 1, если вариант компонентов сети $v_i \in V_i$ удовлетворяет требованию P_k ;
- 0, в противном случае.

Задача поиска одного или ограниченной группы вариантов построения компонентов сети, имеющих требуемые значения параметров, может быть записана следующим образом:

$$F_i(X) = \sum_{i=1}^I x_i \rightarrow \min$$
$$\sum_{k=1}^K a_{ik} \cdot x_i \geq 1 \quad x_i = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases} \quad (i=1, \dots, I) (k=1, \dots, K) \quad (1)$$

Переменная x_i принимает значение 1, если v_i включается в множество V^* , 0 в противном случае.

Ограничение в задаче (1) обеспечивает выполнение каждого эксплуатационного показателя.

Задача выбора вариантов построения сети, имеющих, прежде всего, наиболее важные с точки зрения эксперта значения эксплуатационных показателей, осуществляется в рамках задачи следующего вида:

$$F_i(X) = \sum_{i=1}^I c_i \cdot x_i \rightarrow \max$$
$$\sum_{i=1}^I a_{ik} \cdot x_i \leq S_k \quad x_i = \begin{cases} 1, \\ 0. \end{cases} \quad (k=1, \dots, K) \quad (2)$$

Через c_i обозначена сумма весов w_k эксплуатационных показателей варианта сети v_i .

$$c_i = \sum_{k=1}^K w_k \cdot a_{ik}$$

Весы показателей w_k задаются экспертами для каждого эксплуатационного показателя и могут колебаться, например, от 1 до 10. Если экспертов несколько, то вес каждого эксплуатационного показателя рассчитывается как средний.

Через S_k обозначено количество вариантов организации сети, имеющих требуемое значение показателя P_{ik} .

$$S_k = \sum_{i=1}^I a_{ik} \quad (k=1, \dots, K)$$

Заключение

Предложенные модели являются оптимизационными задачами с булевыми переменными, определенными на конечном дискретном множестве допустимых решений. Задачи носят комбинаторный характер. Алгоритмы их решения должны обеспечить сокращенный перебор возможных вариантов решения.

Для решения представленных задач (1) – (2) целесообразно использовать алгоритмы, ориентированные на метод случайного поиска [3].

Данные алгоритмы позволяют осуществить такое варьирование булевыми переменными, описывающими конечное множество допустимых альтернативных решений, которое привело бы к поиску комбинаций уровней переменных, обеспечивающих экстремальное решение поставленных задач.

На втором этапе на основе множества вариантов построения компонентов сети, допустимых по эксплуатационным показателям, реализуется окончательный выбор состава компонентов сети по показателям качества.

В качестве оценочного показателя может быть выбрана стоимость оборудования.

Выбирается тот вариант организации сети, который обеспечивает минимальную стоимость.

Стоимость варианта организации сети складывается из стоимости компьютеров, коммутаторов (или аналогичного оборудования), сетевых адаптеров и кабеля.

Возможно также предоставления экспертам списка всех вариантов компоновки сети с указанием эксплуатационных характеристик и ранжированных по увеличению стоимости приобретения.

В этом случае эксперт получает право выбрать тот вариант состава компонентов сети, который кажется ему наиболее приемлемым.

На основании предложенных расчетов можно будет сделать выбор наиболее предпочтительного варианта состава компонентов сети, необходимого для организации ее эффективной работы.

Полученный вариант состава компонентов локальной сети будет иметь приемлемые эксплуатационные характеристики и минимальную стоимость оборудования.

Литература

1. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 992 с.
2. Таненбаум, Э. Компьютерные сети [Текст] / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. 5-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 960 с.
3. Сергеев, М.Ю. Адаптивный алгоритм выбора компонентов учебно-информационной системы [Текст] / М.Ю. Сергеев, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2005. - Т. 1. - № 5. - С. 4-7.

Воронежский государственный технический университет

COMPUTER NETWORK MODELING WITH THE USE OF CASE-TOOLS

M.Yu. Sergeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mikesergeev@mail.ru

T.I. Sergeeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergeevati_vgtu@mail.ru

The modeling and optimization of the network are important tasks of network management system. Modeling involves the formation of acceptable variants of network components composition. The components of the network are the computers and communications equipment. Optimization is load, performance and equipment cost analysis. Existing specialized network performance simulation program do not form alternatives to the network construction. These programs do not implement the optimization of network structure using technical and economic indicators. The modeling and optimization of the network it is advisable to carry out on the basis of a specialized decision-support system.

This article provides a structure of specialized decision support system on the composition of network components. The system includes standard specialized CASE tool for generating variants of network equipment, expert evaluating options subsystem and choosing the best option subsystem for composition of LAN equipment. Software CASE tool forms the composition of equipment. Experts evaluate the composition of the following characteristics: average server and workstations load, the average time delay on switching equipment, the average data rate, etc. Subsystem choosing the best option for network organization using cost indicators.

Forming the set of alternative options for networking is implemented within the framework of optimization models. The first version of the model allows you to select a limited set of alternatives. The second option creates an alternative model based on expert opinion. Experts designate the weighting coefficients of importance for the operational characteristics. Selects an options with high total coefficients of importance. Selection of the optimal variant is based on cost indicators.

Key words: equipment composition, modeling, optimal selection, performance evaluation

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. Kompyuternie seti. Principy, tehnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. 5th edition. – SPb.: Piter, 2016. – 992 p.
2. Tanenbaum A., Wetherall D. Kompyuternie seti [Computer networks]. 5th edition. – SPb.: Piter, 2016. – 960 p.
3. Sergeev M.Yu., Podvalny S.L. Adaptivnyy algoritm vybora komponentov uchebno-informatsionnoy sistemy // The Bulletin of Voronezh State Technical University. - Voronezh: VSTU, 2005. T. 1. № 5, p. 4-7.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ГРАФИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ НА UNIX-ПОДОБНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.Д. Данилов, В.А. Минеев

В данной статье рассматриваются несколько программных комплексов для решения инженерных задач в рамках проектирования электронных устройств. Исходя из открытости исходного кода и выходных файловых форматов рассматриваемых систем, разрабатывается программа, позволяющая выполнить построение модели электронного устройства, основываясь на исходных данных выходных форматов одной рассматриваемой системы, в формат, доступный для других инженерных программ. Это позволяет создавать на ее основе новые инструменты и применять новые методы решения инженерных задач как для отображения спроектированного электронного изделия, так и для этапов его проектирования. Представлены алгоритмы выполнения программы и показаны конечные результаты ее работы. Предложен вариант возможного замещения используемых программных средств на свободные программные аналоги с целью их доработки под конкретные инженерные задачи

Ключевые слова: компьютерные системы, программное обеспечение, моделирование, визуализация

Введение

В настоящее время сложно представить себе процесс проектирования без вывода результатов расчетов в графическом виде. Такой вид представления информации нагляднее и удобнее чем алфавитно-цифровой. Подавляющее большинство систем автоматизированного проектирования имеют такую возможность. Если устройство моделируется собственной программой инженера, а не в какой-либо системе проектирования, то вывод информации в графическом виде необходимо организовывать собственноручно. Работа с графикой, особенно трехмерной, достаточно сложна и требует специальных навыков, а так же требуется много времени для создания таких подпрограмм, для их тестирования и отладки.

Для визуализации и анализа данных используют вычислительную технику почти повсеместно, ведь с задачей наглядного представления данных и анализа больших массивов числовой информации сталкиваются во многих областях. Это моделирование, обработка результатов экспериментов, анализ данных дистанционного зондирования, решения различных инженерных задач, при этом разработчикам часто приходится иметь дело с двумерными наборами чисел. Такими наборами могут являться как результаты численного моделирования, так и данные, полученные с различных приборов. Для получения, обработки и визуализации этих данных на компьютере требуется специальное программное обеспечение.

На сегодняшний день существует довольно большое количество средств обработки и визуализации инженерных задач при разработке электронных изделий, предназначенных для работы под операционными системами семейства Windows: PCAD/Altium, OrCAD, Proteus. Перечисленное

программное обеспечение работает только под операционными системами семейства Windows, что исключает возможность перехода на другие семейства операционных систем, как BSD и Linux, что негативно влияет на разработку микроэлектроники в военных целях.

Дело в том, что ОАО «НПО РусБИТех» во исполнение распоряжения Правительства РФ № 2299-р от 17 декабря 2010 г., утверждающего План перехода федеральных органов исполнительной власти и федеральных бюджетных учреждений на использование свободного программного обеспечения разработала операционную систему специального назначения на базе ядра Linux (Astra Linux). Из этого возможно предположить, что в скором времени возникнет вопрос разработки программного обеспечения на другое семейство операционных систем.

Чтобы сократить время на разработку, предлагается использовать готовые решения на открытом исходном коде по лицензии GNU GPL. Самым успешным программным комплексом разработки и визуализации электронных устройств является KiCAD.

Визуализация разработанного электронного устройства дает ряд преимуществ при проектировании изделий, где данное электронное устройство будет в дальнейшем использоваться. Но в рамках данного программного комплекса это реализовано не полностью и требуется использование других программных средств или доработка этого комплекса.

Основная часть

KiCAD использует в своей работе три типа файлов: - файлы *схем* *.sch (EESchema) - файлы *библиотек* *.lib (EESchema) - файлы *печатных плат* *.kicad_pcb (PCBnew).

Все эти файлы являются простыми текстовыми файлами ASCII, что позволяет нам использовать их в других программных комплексах или для разработки новых модулей программы. Для этого разработаны некоторые решения для применения готовой модели устройства в других системах

Данилов Александр Дмитриевич - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Минеев Валентин Александрович - ВГТУ, аспирант, e-mail: mineev_valentin@mail.ru

проектирования, что говорит о достаточной гибкости программного комплекса.

Ниже представлены параметры файлов необходимые для построения трехмерной модели устройства.

Описание модуля:

\$MODULE <имя модуля>

и заканчивается

\$EndMODULE <имя модуля>

Описание модуля содержит четыре раздела:

- общая информация (фиксированного размера);

- описания полей (переменного размера);

- описания графики (переменного размера);

- описания выводов (переменного размера);

- информация о трёхмерной модели элемента.

Все размеры указываются относительно положения модуля. Это означает, что все координаты и размеры указаны для положения модуля в начале координат с нулевым углом поворота. В случае, если модуль повернут или отражён зеркально, реальные координаты пересчитываются соответствующим образом.

Таблица 1

Представление модулей в файле печатных плат

Пример	Описание
\$MODULE bornier6	\$MODULE <имя модуля>
Ro 62000 30500 2700 15 3EC0C28A 3EBF830C ~	Ro X Y ориентация(0.1 град) слой метка_времени параметр_1 параметр_2 параметр_1 - "F"-фиксирован, "~"- можно перемещать параметр_2 - "~" или "P" - не размещён или размещён автоматически.
Li bornier6	Указывает библиотечное название модуля
Cd комментарий	Строка комментария
Kw Keyword1 Keyword2 ...	Ключевое слово для выбора модуля
Sc 3EBF830C	Временная метка
Op 0 0 0	<цена поворота 90> <цена поворота 180> цена поворота для авторазмещения, от 0 (поворот запрещён) до 10 (нулевая цена)

Таблица 2

Представление графики в файле печатных плат

Пример	Описание
DS -6000 - 1500 -6000 1500 120 21	DS - рисовать сегмент (линию). Параметры: координаты начальной и конечной точки, толщина линии и слой.
DC ox oy fx fy width layer	DC - рисовать окружность. Параметры: координаты центра, координаты точки, толщина линии и слой.
DA x0 y0 x1 y1 angle width layer	DA - рисовать дугу. Параметры: координаты начальной точки, конечной точки, угла, толщины линии и слоя.

Трёхмерная модель модуля представляет собой файл в формате vtml, полученный с помощью трёхмерного редактора Wings3D. Трёхмерную модель можно масштабировать, поворачивать и перемещать, благодаря чему одну трёхмерную модель можно использовать для разных модулей (например, резисторы различных размеров). Некоторые модули элементов поверхностного монтажа используют это. Возможно также масштабирование элементов для лучшего отображения.

Таблица 3

Представление трехмерных моделей в файле печатных плат

Пример	Описание
\$\$SHAPE3D	Начало блока
Na "device/bornier6.w rl"	Имя файла трёхмерной модели
Sc 1.00000 1.00000 1.00000	Масштаб по осям X Y Z
Of 0.00000 0.00000 0.00000	Сдвиг по осям X Y Z
Ro 0.00000 0.00000 0.00000	Угол поворота по осям вокруг осей X Y Z (в градусах)
\$EndSHAPE3D	Конец блока

Координаты трёхмерной модели мы задаем относительно координат модуля. Трёхмерная модель при отображении подвергается масштабированию, смещению и повороту в соответствии с указанными параметрами, после чего масштабируется, смещается и поворачивается вместе с модулем. Если модуль находится с обратной стороны платы, то координаты инвертируются соответствующим образом. Один модуль может иметь несколько трёхмерных моделей, например, микросхема и её колодка.

Как указывалось ранее, для разработки готового изделия требуются дополнительные программные средства. Проанализировав существующее свободное программное обеспечение наиболее подходящим, для дальнейшей разработки программы, является FreeCad. Кроме своей открытости продукт имеет мощную систему макрокоманд на синтаксисе python, позволяющую выполнять сложные графические построения.

KiCad (на данный момент) имеет устаревший формат vtml, а основным форматом передачи трехмерных моделей является step, то требуется выполнить преобразование из vtml в step. Прямое преобразование имеет ряд проблем. Входной формат содержит полигональную информацию. Целевой формат содержит твердотельную или поверхностную (NURBS) информацию. В большинстве случаев требуется либо ручная пост-обработка файла, либо полная обрисовка поверхностей.

Для построения конечной модели устройства созданной в программном комплексе KiCad потребуется информация о модулях перечисленная в

табл. 1 и информация об используемой модели (табл. 3), которую содержат файлы *.kicad_pcb.

При построении полноценной модели устройства, данных о текущем положении модулей и их моделей недостаточно. Для полноты моделирования необходима исходная информация о печатной плате устройства, которую также несут файлы *.kicad_pcb. Габариты печатной платы определяются слоем Edge.cuts, толщиной (thickness), а также примитивами: линия(gr_line), дуга(gr_arc), окружность(gr_circle).

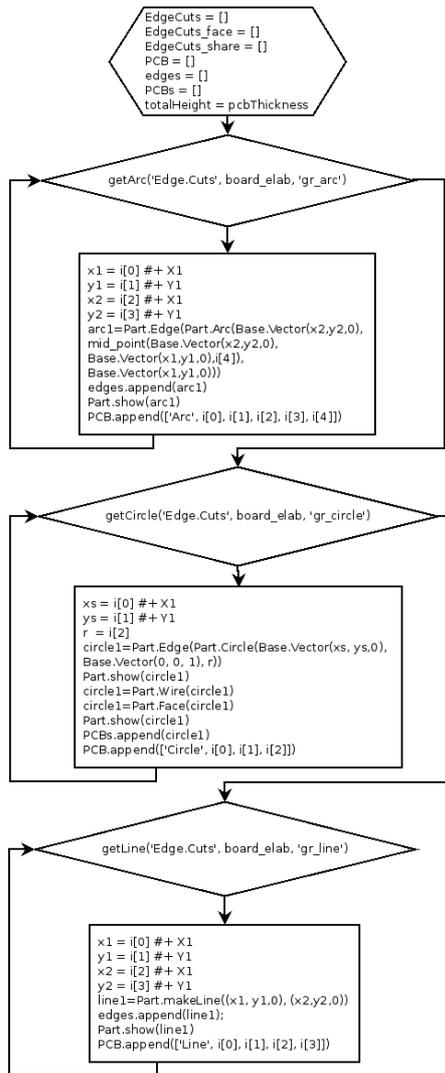


Рис. 1. Алгоритм получения информации из исходного файла о примитивах

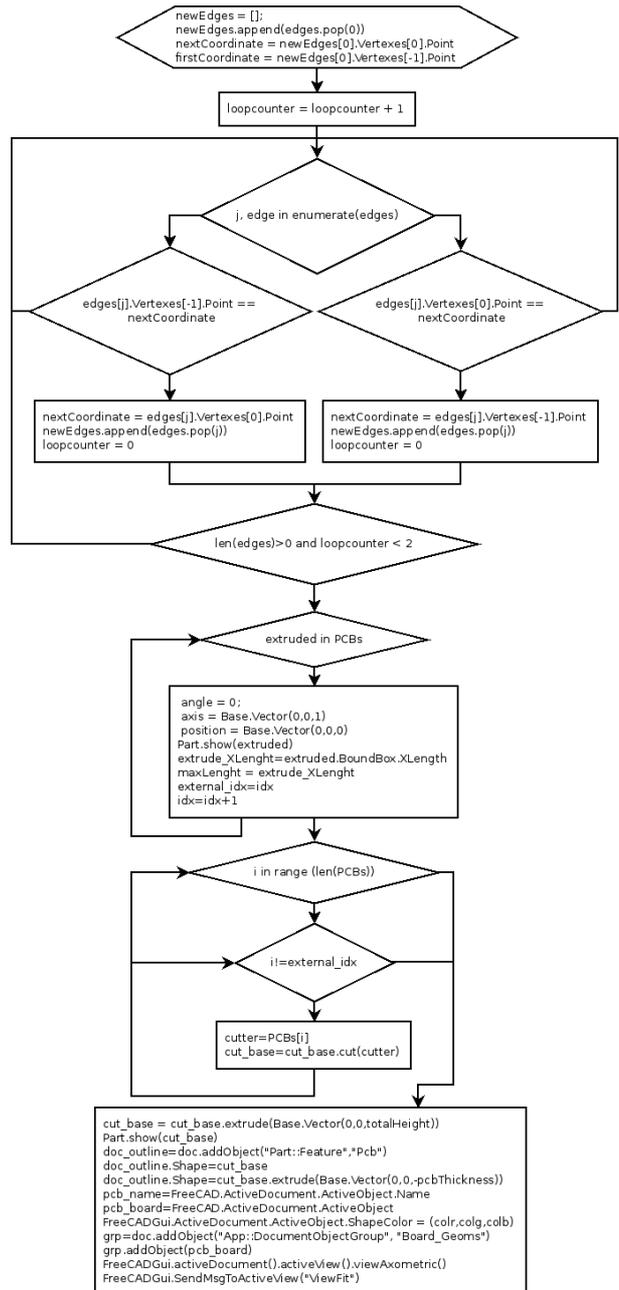


Рис. 2. Алгоритм построения модели печатной платы

На рис. 1 изображена часть алгоритма построения трехмерной модели устройства, в котором собирается информация о примитивах с учетом их геометрических характеристик. Полученные данные используются в алгоритме построения модели печатной платы, изображенном на рис. 2.

После выполнения алгоритмов построения печатной платы по примитивам с учетом ее толщины, выполняется алгоритм установки модулей (элементов) печатной платы, изображенный на рис. 3.

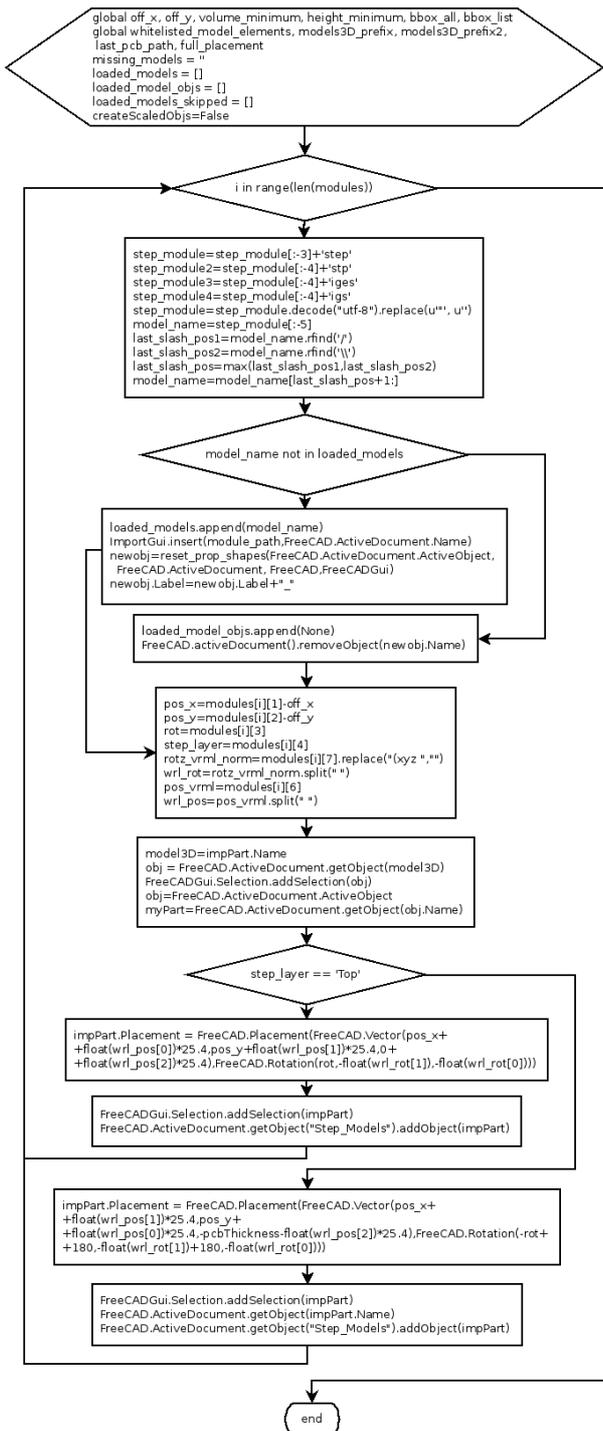


Рис. 3. Алгоритм установки модулей по исходным данным

Результатом работы программы является трехмерная модель электронного устройства (рис.4), которая доступна для редактирования в программном комплексе FreeCad с последующим сохранением в формате step, доступным для использования в других программах.

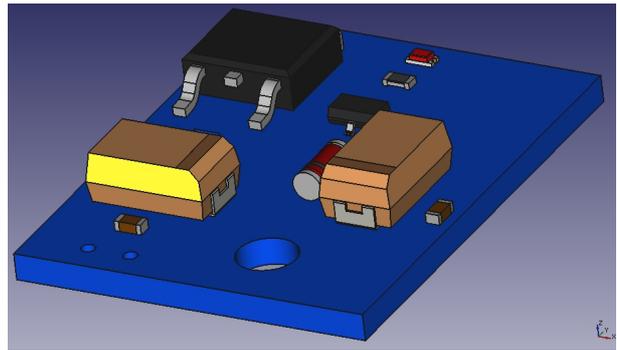


Рис. 4. Выходная модель электронного устройства

Вывод

Использование программного комплекса проектирования электронных устройств KiCAD, имея открытость исходного кода и выходных файловых форматов, позволяет создавать на ее основе новые инструменты и применять новые методы решения инженерных задач, как для отображения спроектированного устройства, так и для этапов его проектирования. Кроме этого, программный комплекс является кроссплатформенным программным обеспечением, что позволяет использовать его совместно с другими программами, которые доступны только для одной платформы.

Литература

1. Боресков, А.В. Компьютерная графика: первое знакомство [Текст] / А.В. Боресков, Е.В. Шикин, Г.Е. Шикина. – М.: Финансы и статистика, 1996.
2. Данилов, А.Д. Иерархическая структура процесса тестирования сложного программного обеспечения [Текст] / А.Д. Данилов, А.И. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 3-1. С. 18-21.
3. Данилов, А.Д. Цифровые системы управления [Текст] / А.Д. Данилов, В.Н. Головнев. – Воронеж: ГОУ ВПО "Воронежская гос. лесотехническая акад.", 2007. - 235 с.
4. Данилов, А.Д. GTD, коллаборация и автоматизация документооборота на крупных предприятиях с распределенной структурой [Текст] /А.Д.Данилов, А.Н. Боровцов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011.- Т. 7.- №1.- С. 69-73.
5. Данилов, А.Д. Модели для автоматизированного проектирования поточных производств [Текст] / А.Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2009.- Т. 5.- №6.- С. 163-166.
6. Тамре Л. Введение в тестирование программного обеспечения [Текст] / Л. Тамре. – М.: Вильямс, 2003. 354 с.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Astra_Linux
8. https://ru.wikibooks.org/wiki/KiCad/Формат_файлов

VISUALIZATION OF ENGINEERING PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC PRODUCTS ON UNIX-LIKE OPERATING SYSTEMS

A.D. Danilov, Doctor of technical sciences, professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

V.A. Mineev, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mineev_valentin@mail.ru

This article discusses several software systems to solve engineering problems in the framework of the design of electronic devices. Based on open source code and output file formats, the systems in question, developed a program that allows the construction of an electronic device to perform model based on raw data output formats of the system in a format accessible to other engineering programs. It allows you to create on its basis, new tools and new methods for solving engineering problems, for display designed electronic products, as well as for stages of its design. The algorithms of the program and shows the final results of its work. A variant of a possible replacement of software tools in the free software counterparts with a view to finalizing them for specific engineering problems

Key words: Computer systems, software, modeling, visualization

References

1. Boreskov A.V., Shikin E.V., Shikina G.E. Kompyuternaya grafika: pervoe znakomstvo [Computer Graphics: first encounter]. Moscow. Finance and Statistics. G. 1996
2. Danilov A.D., Fedorov A.I. Ierarhicheskaya struktura processa testirovaniya slozhnogo programmogo obespecheniya [The hierarchical structure of the testing process complex software] // The Bulletin of Voronezh State Technical University. 2014. T. 10. № 3-1. S. 18-21.
3. Danilov A.D., Golovnev V.N. Cifrovye sistemy upravleniya [Digital control systems]. - Voronezh: GOU VPO "... Voronezh State Forestry Engineering academician", 2007. 235 p.
4. Danilov A.D. GTD, kollaboraciya i avtomatizaciya dokumentooborota na krupnyh predpriyatiyah s raspredelennoj strukturoj [GTD, collaboration and workflow automation in large enterprises with distributed structure] / A.D.Danilov, A.N.Borovtsov // The Bulletin of Voronezh State Technical university.- 2011.- T. 7.- №1.- S. 69-73.
5. Danilov A.D. Modeli dlya avtomatizirovannogo proektirovaniya potocnyh proizvodstv [Models for CAD line production] / A.D.Danilov // The Bulletin of Voronezh State Technical university.- 2009.- T.5.- №6.- S. 163-166.
6. Tamre L. Vvedenie v testirovanie programmogo obespecheniya [Introduction to software testing]. - M .: Williams, 2003. 354 p.
7. https://ru.wikipedia.org/wiki/Astra_Linux.
8. https://ru.wikibooks.org/wiki/KiCad/Формат_файлов.

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЕРТОЛЕТА

С.В. Васильев, В.А. Демчук, В.И. Рубинов, В.А. Малышев, **А.А. Тарасов**

Одним из ключевых требований к архитектуре современных комплексов бортового оборудования, построенных на принципах интегрированной модульной авионики, является отказоустойчивость. Обеспечение данного свойства для бортовых информационно-управляющих систем достигается различными способами, в том числе оптимальным управлением структурной динамикой. Анализ и обеспечение отказоустойчивости пилотажно-навигационного комплекса вертолета, рассматриваемого в работе как многофункциональная информационно-управляющая система, возможны в рамках развивающегося научного направления, в котором нештатные состояния системы, вызванные отказами, рассматриваются как допустимые и для них формируется адекватное (функционально устойчивое) управление, направленное на парирование последствий отказов и поддержание выполнения функций системы. За счет этого управления обеспечивается перераспределение программных и аппаратных ресурсов системы для выполнения набора заданных функций даже в условиях отказов. Однако существующие подходы предполагают «слепую» подмену модуля в части отказавшего элемента, отвечающего в данном модуле за ту или иную функцию, другим модулем в соответствии с планом реконфигурации системы. В данной статье авторами предложена модель функциональных отказов при оценке устойчивости пилотажно-навигационного комплекса вертолета с учетом зависимых функциональных отказов. Показана необходимость учета логических связей между многофункциональными модулями в реальной физической структуре

Ключевые слова: пилотажно-навигационный комплекс, функциональная устойчивость, функциональный отказ

Введение

Эффективность работы пилотажно-навигационного комплекса (ПНК, комплекс, система) во многом определяется его способностью нормально функционировать в условиях различных дестабилизирующих факторов. Одним из ключевых качеств современных ПНК при этом является отказоустойчивость. В условиях преднамеренных и случайных воздействий комплекс должен реализовать возложенные на него функции, в том числе, и в случае отказа отдельных его элементов. Качество ПНК, связанное с его способностью выполнять весь или некоторый (критически важный) набор заданных функций в условиях функциональных отказов с определенным уровнем гарантии сохранения значений характеристик их выполнения, трактуется как *функциональная устойчивость* [1]. Под обеспечением функциональной устойчивости понимается формирование множества состояний ПНК, в которых он способен гарантированно выполнять

определенные функции с требуемым качеством в условиях воздействия различных угроз.

Функциональные отказы представляют собой события, заключающиеся в потере способности выполнения модулем возложенных на него функций. При этом модуль представляет собой некоторый функциональный элемент (ФЭ), реализующий одну или несколько (универсальный) функций. По количеству «отказавших» функций модуля выделяют частичные и полные отказы.

Целью работы является повышение функциональной устойчивости ПНК в условиях воздействия различного рода дестабилизирующих факторов путем разработки модели, учитывающей логические связи между ФЭ при возникновении функциональных отказов.

1. Определение работоспособности ПНК

Наличие в системе многофункциональных (МФМ), или универсальных, модулей определяет функциональную избыточность. В таком случае при возникновении частичных отказов модулей ПНК можно говорить о переходе системы в новое состояние. При этом работоспособность системы устанавливается следующим образом.

Пусть произвольное состояние системы s_v характеризуется некоторой бинарной матрицей $B(s_v) = [b_{ij}^{(v)}]$ размерности $n \times m$, где $b_{ij}^{(v)} \in \{0, 1\}$, причем

$$b_{ij}^{(v)} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й модуль способен} \\ & \text{выполнить } j\text{-ю функцию,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где n – количество модулей в системе, m – количество функций, возложенных на систему.

Распределение функций, выполняемых модулями ПНК, будем задавать матрицей

Васильев Станислав Валерьевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», адъютант, тел. 8(920) 4594296, e-mail: stanislav-vas1986@mail.ru

Демчук Валерий Анатольевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, доцент, начальник факультета, тел. 8(919) 2498708, e-mail: vad912@mail.ru

Рубинов Владимир Иванович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, тел. 8(980) 3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru

Малышев Владимир Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р техн. наук, доцент, тел. 8(910) 2823330, e-mail: vamalyshhev@list.ru

Тарасов Александр Алексеевич – ИИИТБ, д-р техн. наук, профессор

распределения $R_k^{(v)}$, представляющей собой матрицу подстановки, в которой

$$r_{ij}^{(k)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_k(i) = j, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\sigma_k(i)$ – i -й элемент k -й подстановки на множестве $\{1, 2, \dots, n\}$, $k \in \{1, 2, \dots, n!\}$.

Под *работоспособным* состоянием ПНК будем понимать такое состояние, при котором существует хотя бы один вариант распределения функций между модулями, определяемый матрицей $R_k^{(v)}$, и который позволяет выполнять их одновременно, т.е.

$$b_{i, \sigma_k(i)}^{(v)} = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (1)$$

В таком случае, состояние s_v можно считать работоспособным, если существует такая подстановка σ_k , при которой диагональное произведение элементов матрицы состояния $B(s_v)$ окажется положительным, т.е.

$$\exists \sigma_k : \prod_{i=1}^n b_{i, \sigma_k(i)}^{(v)} > 0, \quad (2)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n\}, k \in \{1, 2, \dots, n!\}.$$

Перманент матрицы состояния $B(s_v)$ порядка n определяется следующим образом [2]:

$$\text{per } B = \sum_{\sigma} b_{1, \sigma_1(1)}^{(v)} \cdot b_{2, \sigma_2(2)}^{(v)} \cdot \dots \cdot b_{n, \sigma_n(n)}^{(v)}, \quad (3)$$

т.е. перманент есть сумма диагональных произведений, задаваемых множеством подстановок σ_k . Таким образом, положительное значение перманента матрицы состояния $B(s_v)$ подразумевает наличие под знаком суммы хотя бы одного ненулевого диагонального произведения, что, в свою очередь позволяет на основании (2) утверждать о том, что состояние s_v является работоспособным.

Прогнозирование работоспособной траектории ПНК вертолета является задачей нетривиальной. Приведенный выше математический аппарат позволяет моделировать поведение системы в условиях возникновения частичных функциональных отказов модулей, однако данный подход не учитывает логические связи между элементами системы. Например, в случае потери i -м модулем способности выполнить k -ю функцию в рассмотрение вводится лишь порядок «подмены» i -го модуля в части отказавшего элемента, отвечающего в данном модуле за эту функцию, другим модулем в соответствии с планом реконфигурации системы. Также невозможно установить влияние отказа данного модуля на процесс реализации некоторого набора *внешних* функций F_1, F_2, \dots, F_k . По сути, предложенный подход адаптирован лишь для систем, выполняющих одну единственную внешнюю функцию, и в случае возникновения частичного функционального отказа выполнение данной функции полностью определяется условием (1).

Таким образом, разработка научно-методического аппарата оценки устойчивости ПНК в условиях возникновения функциональных отказов, реализующего возможность учета логических связей элементов системы, а также критичности и последствий их отказа при реализации набора внешних функций, возложенных на систему, является в достаточной мере актуальной задачей.

2. Модель функциональных отказов

Подход, представленный выше, не чувствителен к особенностям структуры системы, в то время как реальные системы характеризуются наличием логических связей, что, в свою очередь, требует разработки модифицированного математического аппарата, учитывающего влияние отказа одних модулей на другие. В частности, подобные особенности приходится учитывать для иерархических систем, имеющих направленный информационный процесс.

Влияние отказов одних элементов системы на другие формально можно представить в виде матрицы W размера $n \times m$, где n – количество модулей в системе, m – количество функций, выполняемых данными модулями, $m=n$. Если выполнение j -й функции зависит от результата выполнения g -й и h -й функций, то «отказ» любой из двух приведет к отказу j -й функции. То есть существуют условия на выполнимость j -й функции при наличии некоторым модулем способности ее выполнить. Данные условия можно выразить следующим образом

$$f_j^* = f_g \wedge f_h \wedge f_j.$$

В общем случае

$$f_j^* = \bigcap_K f_z,$$

где K – набор функций, от которых зависит выполнение функции f_j^* , $z \in K$.

Матрица W формируется следующим образом.

Пусть система имеет матрицу состояния $B(S_v)$ размера $n \times n$. Если функция f_{ij} , где i – номер модуля в системе, j – номер функции, не зависит от выполнения других функций, то $w_{ij} = b_{ij}$, где w_{ij} и b_{ij} – элементы матриц W и B соответственно. В случае, если выполнение f_{ij} определяется результатом других функций, то элементы матрицы W определяются следующим путем.

Пусть $f_j^* = \bigcap_K f_z$. Для элемента w_{ij} матрицы W строится дополнительная матрица W^* путем вычеркивания столбцов матрицы B , соответствующим функциям f_z , не влияющим на результат выполнения f_j , $\bar{z} \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus K$. Матрица W^* характеризует возможности системы для реализации функции f_{ij} . Однако, в силу учета

реальных физических связей не все модули могут быть задействованы для выполнения условия $f_{ij} = \bigcap_k f_z$, а лишь те, что непосредственно связаны с i -м модулем. В таком случае представим имеющуюся (концептуальную) структуру ПНК в виде помеченного ориентированного графа $G(V, E)$, где V – множество вершин графа, соответствующих модулям системы, E – множество дуг, соответствующих связям между модулями. В качестве примера на рис. 1 представлена структура системы, а также ее орграф (рис. 2)

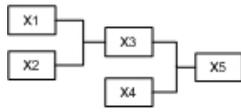


Рис. 1. Структура информационной системы

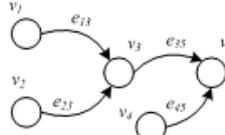


Рис. 2. Орграф $G(V, E)$ системы

Наличие связей между вершинами графа G определяют с помощью матриц инцидентности, смежности или достижимости. Если технические возможности системы позволяют передавать информацию в необработанном виде из модуля i в модуль k , то для нахождения путей, состоящих из 3 и более вершин, можно воспользоваться матрицей достижимости L^* [3].

Если матрица смежности есть L , то для определения путей длины 2 находят композицию отношения L с L

$$L \circ L = \{(v_i, v_j) : \exists v_k \in V : (v_i, v_k), (v_k, v_j) \in E\}. \quad (4)$$

По определению [4], $L \circ L$ есть

$$L^2 = (l_{ij}^2)_{n \times n} = \left(\sum_k l_{ik} l_{kj} \right) = ((l_{i1} \wedge l_{1j}) \vee (l_{i2} \wedge l_{2j}) \vee \dots \vee (l_{in} \wedge l_{nj})). \quad (5)$$

Аналогичным образом находят булевы степени матрицы смежности L^3, L^4, \dots, L^n . Таким образом, может быть получена информация о всех путях длины от 1 до n , а матрица

$$L^* = L \vee L^2 \vee L^3 \vee \dots \vee L^n, \quad (6)$$

есть искомая матрица достижимости.

В случае, когда для выполнения f_{ij} задействуются только смежные модули, необходимо определить пути единичной длины, т.е. $L^* = L$. Матрица смежности L графа G определяется следующим образом

$$l_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (i, j) \in E, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (7)$$

$$L(G) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Преобразование матрицы W^* с учетом связей модулей, хранящихся в L , заключается в поэлементном умножении столбцов W^* на i -й

столбец матрицы L . Такая операция в теории матричного исчисления носит название произведения Адамара [2, 4, 5], однако она не определена для перемножаемых матриц различной размерности. Для преодоления этого ограничения сформируем вспомогательную матрицу-маску D размерности $n \times z$, где n – количество модулей в системе, z – количество функций, задействованных при выполнении f_{ij} . Матрица D составляется из столбцов, каждый из которых равен L_i

$$D_i = L_i, \forall i \in (1, z). \quad (9)$$

Произведение Адамара матриц W^* и D есть матрица W^{**}

$$W^{**} = [W^* \circ D]_{ij} = [W^*]_{ij} \circ [D]_{ij}, \quad (10)$$

поле которой освобождено от скаляров, соответствующих функциям модулей, несмежных j -му модулю. Далее рассчитывается перманент матрицы W^{**} [2]

$$\text{per } W^{**} = \sum_{k=1}^{n!} \prod_{i=1}^z w_{i, \sigma_k(i)}. \quad (11)$$

Элементы матрицы W определяются следующим образом

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } \text{per } W^{**} > 0, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, при переходе системы из состояния S_v в состояние S_{v+1} вследствие возникшего частичного функционального отказа пересчитывается матрица W с учетом отказавшего элемента, окончательный вид матрицы состояния определяется выражением

$$B^*(S_{v+1}) = B(S_{v+1}) \circ W. \quad (13)$$

Моделирование «поведения» системы с учетом (13) проводилось с помощью программного продукта, разработанного в среде MATLAB© (рис. 3).

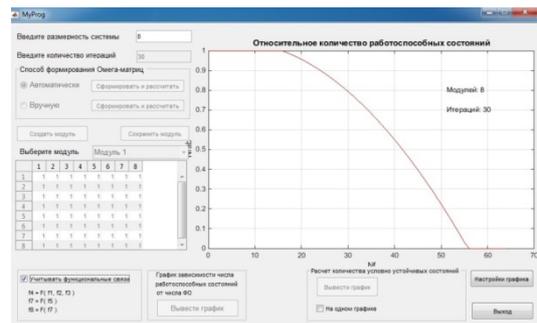


Рис. 3. Программная реализация модели функционирования системы с учетом логических связей между модулями

Моделирование осуществлялось для произвольной системы, имеющей структуру, изображенную на рисунке 4. Расчеты проводились для двух матриц состояния $B_1(S_{v0})$ ($b_{i,j} = 1, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$) и $B_2(S_{v0})$. В качестве

условий выполнения отдельных функций принималось следующее:

$$f_4^* = f_1 \wedge f_2 \wedge f_3 \wedge f_4, \\ f_7^* = f_5 \wedge f_7, f_8^* = f_7 \wedge f_8.$$

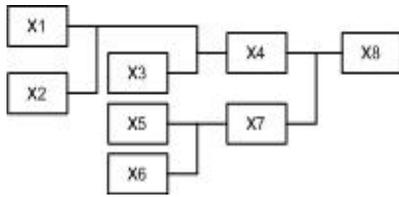


Рис. 4. Структура системы

$$B_2(S_{v_0}) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

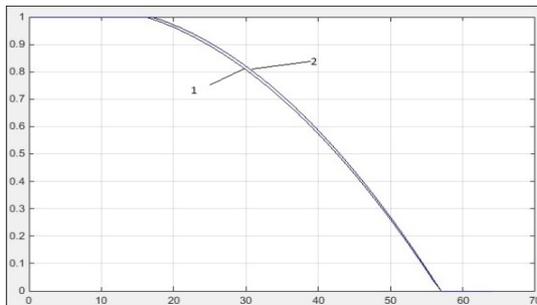


Рис. 5. Количество устойчивых состояний $N_{уст}$ для $B_1(S_{v_0})$

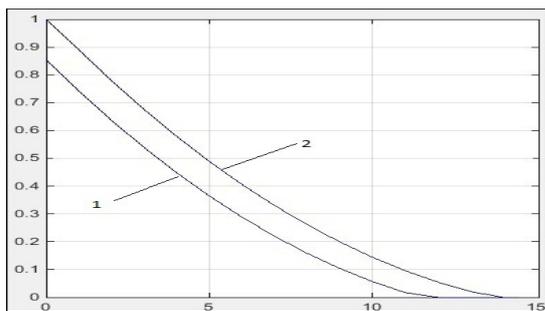


Рис. 6. Количество устойчивых состояний $N_{уст}$ для $B_2(S_{v_0})$

На рис. 5 и 6 отражены зависимости количества устойчивых состояний от числа

функциональных отказов для матриц состояния $B_1(S_{v_0})$ и $B_2(S_{v_0})$ соответственно.

Из приведенных графиков видно, что учет функциональных связей между модулями системы для различного уровня избыточности имеет неодинаковый эффект (кривые 1 и 2). Так,

$$\max \Delta N_{уст}(B_1(S_{v_0})) = 0,01, \\ \max \Delta N_{уст}(B_2(S_{v_0})) = 0,13.$$

Подобный результат объясняется большими возможностями системы в первом случае на функциональную реконфигурацию. Система во втором случае имеет достаточно разреженную матрицу состояния, и, как следствие, более чувствительна к «потерям» (отказам) элементов. Также стоит отметить, что ужесточение условий на выполнимость отдельных функций будет приводить к дальнейшему росту $\Delta N_{уст}$.

3. Выводы

Таким образом, в статье предложена модель функциональных отказов, основанная на учете логических связей между многофункциональными модулями ПНК. Показано, что для реальных систем (рис. 6) применение вышеизложенного подхода при проведении анализа функционирования системы является обоснованно необходимым этапом.

Тем не менее, остается неразрешенной задача оценки критичности отказов элементов ПНК и обобщенного ущерба в результате данных отказов. Также актуальной задачей является разработка методики оценки функциональной устойчивости ПНК, выполняющего набор внешних функций F_1, F_2, \dots, F_k , с учетом важности (критичности) данных функций.

Литература

1. Тарасов А.А. Функциональная отказоустойчивость систем обработки информации [Текст] / А.А. Тарасов. – М.: МИНИТ, 2009. – 184 с.
2. Минк Х. Перманенты [Текст]: пер. с англ./ Х. Минк. – М.: Мир, 1982. – 216 с.
3. Бернс К. Теория графов и ее применение [Текст] / К. Бернс. - М.: ИЛ, 1962.
4. Million, Elizabeth. The Hadamard Product.
5. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц [Текст] / Ф.Р. Гантмахер. - 5-е изд. - М.: Физматлит, 2004. - 560 с.

MODEL OF FUNCTIONAL FAILURES OF THE FLIGHT AND NAVIGATION COMPLEX OF THE HELICOPTER

S.V. Vasilyev, Postgraduate, Military and air academy of a name of professor of N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, Voronezh, Russian Federation, e-mail: stanislav-vas1986@mail.ru

V.A. Demchuk, Candidate of Technical Sciences, associate professor Military and air academy of a name of professor of N. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vad_912@mail.ru

V.I. Rubinov, Candidate of Technical Sciences, associate professor Military and air academy of a name of professor of N. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, Voronezh, Russian Federation, e-mail: rubinov777@mail.ru

V.A. Malyshev, Doctor of engineering, associate professor, Military and air academy of a name of professor of N. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vamalyshv@list.ru

A.A. Tarasov, Doctor of engineering, professor, Institute of information sciences and security technologies, Moscow, Russian Federation

One of key requirements to architecture of modern complexes of the airborne equipment constructed on principles of integrated modular avionics, is fail-safety. Security of the given property for board informational-steering systems such is reached by various modes, including optimum control of structural dynamics. The assaying and security of fail-safety of a flight-navigation complex of the helicopter considered in operation as multipurpose informational-steering system, it is possible within the limits of an explicated scientific direction in which the unnominal conditions of system called by failures, are considered as admissible, and for them the adequate (functionally steady) control directed on parrying of consequences of failures and maintenance of execution of functions of system is shaped. At the expense of this control redistribution of program and hardware resources of system for execution of a set of the set functions, even in the conditions of failures is ensured. However, existing approaches assume "blind" substitution of the module regarding the refused element answering in the given module for this or that function, other module according to the plan of reconfiguration of system. Authors in a paper offer a sample piece of functional failures at an estimation of stability of a flight-navigation complex of the helicopter taking into account dependent functional failures. Necessity of the account of logical links between multipurpose modules in real physical structure is displayed

Key words: flight and navigation complex, functional stability, functional failure

References

1. Tarasov A.A. Funkcional'naya otkazoustojchivost' system obrabotki informacii [Functional fault tolerance for information processing systems]. – M.: MINIT, 2009. – 184 s.
2. Mink H. Permanenti [Permanents]: per. S angl. – M.: Mir, 1982. – 216 s.
3. Berns K. Teoriya grafov i ee primeneniye [Graph Theory and its application]. M.: IL, 1962.
4. Million, Elizabeth. The Hadamard Product.
5. Gantmaher F.R. Teoriya matric [Theory of matrices]. 5th ed. - M.: Fizmatlit, 2004. - 560 p

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О РАЗМЕЩЕНИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

Д.Э. Елизаров

В статье рассматривается обобщенная математическая модель задачи о размещении сложноструктурированных развивающихся технических объектов, достоинством которой является возможность ее применения в условиях заранее сформированной структуры системы.

Предлагается алгоритм численной реализации модели задачи о размещении на основе модификации метода ветвей и границ, включающего в свой состав процедуру метода Гомори, предназначенную для формирования графа решений и таблицы рекордов на каждой итерации цикла вычислений. Рассматривается структурная схема предложенного алгоритма, а также подробно описываются алгоритмы работы каждой из включенных в его состав процедур. Разработанный алгоритм предназначен для решения задачи дискретного программирования путем итерационного применения метода Гомори. Результаты решения задачи для каждой итерации цикла в случае удовлетворения условию целочисленности формируют таблицу рекордов, в противном случае формируются новые вершины графа решений с добавлением дополнительных ограничений целочисленности. Механизм альфа-бета отсечения, включенный в состав алгоритма, служит для ускорения его работы за счет предотвращения избыточных вычислений в вершинах графа с аналогичными ограничениями. Приводится пример практической реализации разработанного алгоритма для задачи размещения размерности 3×3 без учета развития системы.

Применение рассмотренной в работе модели и алгоритма ее численной реализации может лежать в условиях решения задачи развития различного рода сложноструктурированных технических систем, включающих информационные, производственные и энергетические системы

Ключевые слова: математическое моделирование, дискретное программирование, оптимизация

Введение

В настоящее время в различных предметных областях актуальность приобретают задачи оптимального территориального размещения объектов сложноструктурированных технических систем, к которым относятся современные системы информационного обслуживания, производственные и энергетические системы и разнообразные сети передачи данных [1,2].

Существующие модели и алгоритмы решения задач оптимального размещения используют аппарат дискретного программирования, с помощью которого задача решается полным, либо частичным перебором [3,4,5,6], что замедляет процесс нахождения оптимального результата. Альтернативой данному подходу является использование эвристических алгоритмов, применение которых не гарантирует нахождение глобального экстремума. В данной статье предлагается гибридный вариант модифицированного алгоритма решения дискретной задачи о размещении, совмещающий в себе реализации метода ветвей и границ, обеспечивающего построение дерева решений, и метода Гомори.

Модель задачи о размещении

Для формального рассмотрения обобщенной задачи оптимального размещения объектов территориально распределенной системы в условиях ее развития введем следующие обозначения:

$U = \{u_1, \dots, u_I\}$ - множество объектов размещения системы u_i , $i = \overline{1, I}$;

$L = \{l_1, \dots, l_J\}$ - множество альтернативных территории размещения l_j , $j = \overline{1, J}$;

p_{ij} - затраты на размещение в составе системы объекта u_i , $i = \overline{1, I}$ в месте l_j , $j = \overline{1, J}$;

d_{ij} - затраты на исключение объекта u_i , $i = \overline{1, I}$ из состава системы с территории l_j , $j = \overline{1, J}$;

v_j - количественный показатель ценности размещения объекта на территории l_j , $j = \overline{1, J}$, физический смысл данного параметра на примере систем информационного обслуживания населения может иметь значение числа пользователей, которое возможно подключить к системе на рассматриваемой территории [7,8];

V_{\min} - ограничение суммарного итогового показателя ценности для всех размещенных объектов системы; на примере систем информационного обслуживания населения данный параметр может иметь значение минимального планового показателя подключенных пользователей системы [7,8].

С использованием введенных обозначений задача оптимального размещения объектов территориально распределенной системы в условиях развития может быть сведена к задаче линейного целочисленного программирования о

Елизаров Дмитрий Эдуардович – ВГТУ, аспирант, e-mail: elizarovdm@list.ru

минимизации суммарных затрат на их размещение и исключение объектов системы [7,8,9,10]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} z_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} (1 - z_{ij}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{объект } u_i \text{ размещается} \\ & \text{на месте } l_j; \\ 0, & \text{не размещается,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} v_j \geq V_{\min}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (4)$$

В данном случае ограничение (3) означает, что суммарная ценность размещенных объектов должна превышать планируемый минимальный порог суммарной ценности V_{\min} . Это позволяет обеспечить ненулевую сходимость модели при решении задачи минимизации (1).

Ограничение (4) гарантирует, что один объект системы не может быть размещен на нескольких территориях одновременно.

Отметим, что описанная постановка задачи размещения подходит как для решения задачи первоначального размещения объектов системы, так и для оптимизации уже имеющейся структуры, для чего необходимо задать равными нулю затраты на ввод в состав системы размещенных объектов $p_{i'j'}$, $i' = \overline{1, I'}$, $j' = \overline{1, J'}$.

Модифицированный алгоритм метода ветвей и границ

Рассмотрим модифицированный алгоритм метода ветвей и границ, который использует процедуру, основанную на применении метода Гомори [11,12,13] для формирования таблицы рекордов, что обеспечивает ускоренное нахождение оптимального результата [10,14].

Структурная схема модифицированного алгоритма метода ветвей и границ на процедурном уровне [15] представлена на рис. 1.

Для детального рассмотрения процедур, входящих в модифицированный алгоритм метода ветвей и границ введем следующие обозначения. Для каждой вершины a_h , $h = \overline{0, H}$ из множества вершин решения $A = \{a_0, a_1, \dots, a_H\}$, поставим в соответствие дискретную переменную x_h (5), определяющую проанализирована ли соответствующая вершина. Для каждой вершины с множеством ограничений R^h , $h = \overline{0, H}$ необходимо

вычислить значение критерия $\min_{z \in R^h} f(z) \in \vec{F}$,

$$\vec{F} = [\min_{z \in R^0} f(z), \min_{z \in R^1} f(z), \dots, \min_{z \in R^H} f(z)].$$



Рис. 1. Структурная схема модифицированного алгоритма метода ветвей и границ с применением метода Гомори

$$x_h = \begin{cases} 1, & \text{в вершине графа } a_h \\ & \text{производилось решение,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Процедура начальной инициализации (рис. 1 – блок 1) определяет начальное множество ограничений R^0 (6) и вектор \vec{F} размерности H , который должен включать результаты решений задачи минимизации при ограничениях вершин.

$$R^0 = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} v_j \geq V_{\min}, \\ \sum_{j=1}^J z_{ij} \leq 1, i = \overline{1, I} \end{array} \right\}, \quad (6)$$

Процедура проверки (рис. 1 - блок 2) служит для определения факта прохождения анализа для всех имеющихся вершин и использует для этого значения, записанные в дискретных переменных x_h (7):

$$\prod_{h=0}^H x_h = 1, \quad (7)$$

Для рассмотрения процедуры выбора вершины графа, которая будет подлежать анализу на текущем шаге алгоритма (рис. 1 – блок 3) введем следующие переменные:

h' - номер текущей вершины графа $a_{h'} \in A, h' \in \{0, 1, \dots, H\}$,

h'' - номер следующей вершины графа $a_{h''} \in A, h'' \in \{0, 1, \dots, H\}$, подлежащей анализу.

Номер начальной вершины графа всегда равен нулю. Для выбора следующей вершины в контексте рассмотрения задачи минимизации предлагается руководствоваться левосторонней системой и выбирать вершины таким образом, чтобы в первую очередь проанализировать вершины с дополнительными условиями на равенство единице.

В случае, если два условия, представленные в алгоритме не проходят проверку, очевидно, что мы находимся в самом начале графа и таким образом $h' = 0$.

Используя введенные обозначения структурная схема алгоритма процедуры выбора анализируемой вершины графа для следующей итерации может быть представлена на рис. 2.

В разработанный модифицированный алгоритм встроен механизм альфа-бета отсечения, заключающийся в сохранении всех решений, полученных в каждой из пройденных вершин графа и последующей проверке наличия существования, полученного при аналогичных условиях, в случае прохождения проверки, вычисления по данной ветке останавливаются.

На рис. 3 изображен пример действия механизма альфа-бета отсечения. В приведенном примере ограничения в вершинах 10 и 11 аналогичны ограничениям в вершинах 2 и 3. А в

вершинах 13 и 14 ограничения аналогичны ограничениям в вершинах 4 и 5. Таким образом, вычисления в вершинах 10, 11, 13, 14 производить не обязательно, т.к. решение заведомо известно.

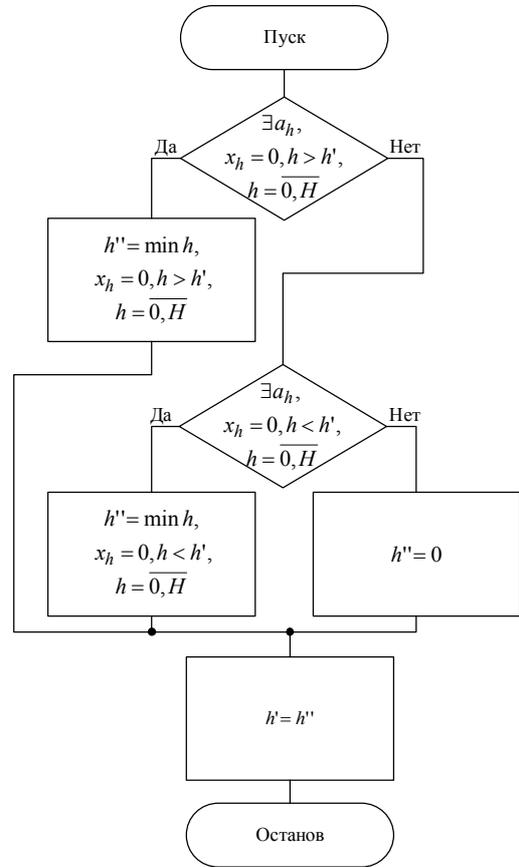


Рис. 2. Структурная схема процедуры выбора текущей анализируемой вершины графа

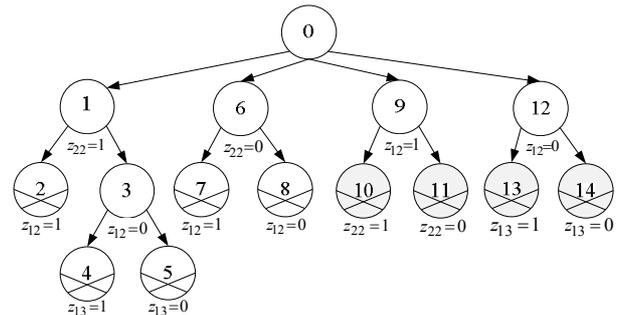


Рис. 3. Пример работы механизма альфа-бета отсечения

Процедура проверки алгоритма альфа-бета отсечения (рис. 1 – блок 4) может быть описана, как проверка на существование среди множества ограничений $R^h, h = \overline{0, H}$, удовлетворяющих условию (8):

$$\exists R^h \vee x^h = 1, R^h \subset R^{h'}, h = \overline{0, H}, \quad (8)$$

В случае прохождения вершиной $a_{h'}$ проверки (8), необходимо получить решение задачи минимизации $\min_{z \in R^{h'}} f(z)$ при ограничениях $R^{h'}$ методом Гомори (рис. 1 - блок 6). Методика и алгоритм решения подобных задач линейной оптимизации рассмотрена в работах [11,12,13]. Результатом решения будет служить вектор $Z^{h'} = [z^{h'_{11}}, z^{h'_{12}}, \dots, z^{h'_{IJ}}]$.

Процедура сохранения результатов минимизации (рис. 1 - блок 7) добавляет в вектор \vec{F} минимальные значения функции $\min_{z \in R^{h'}} f(z)$ при ограничениях $R^{h'}$, необходимое для работы механизма альфа-бета отсечения.

Если вершина прошла проверку механизма альфа-бета отсечения (рис. 1 - блоки 4,5), то в вектор \vec{F} необходимо добавить значение $\min_{z \in R^{h'}} f(z)$.

В противном случае (рис. 1 - блоки 4,5) в вектор \vec{F} под индексом h' необходимо добавить уже имеющееся решение (рис. 1 - блок 4).

Проверка на целочисленность производится после сохранения результатов (рис. 1 - блок 7), ее действие можно в виде условия (9):

$$\forall z_{ij}^{h'}, z_{ij}^{h'} \in [0,1], i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (9)$$

Для формального описания процедуры проверки и добавления нового рекорда (рис. 1 - блок 9) введем множество рекордов Z' . Тогда структурная схема алгоритма процедуры проверки и добавления нового рекорда может быть представлена на рис. 4.

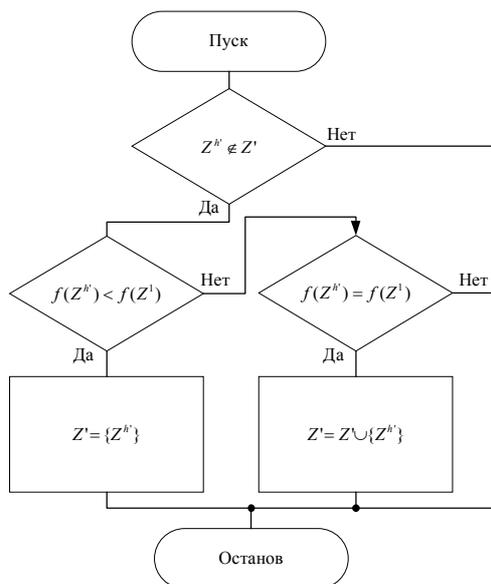


Рис. 4. Структурная схема процедуры проверки и добавления нового рекорда

Для рассмотрения процедуры ветвления (рис. 1 - блок 10) введем множество G , содержащее все переменные решения не удовлетворяющие условию целочисленности, то есть $z_{ij}^{h'} \in G$ если $z_{ij}^{h'} \notin [0,1]$.

При этом $N^{h'}$ - общее число нецелочисленных переменных текущего решения.

С использованием введенных обозначений структурную схему процедуры ветвления можно представить в следующем виде (рис. 5):

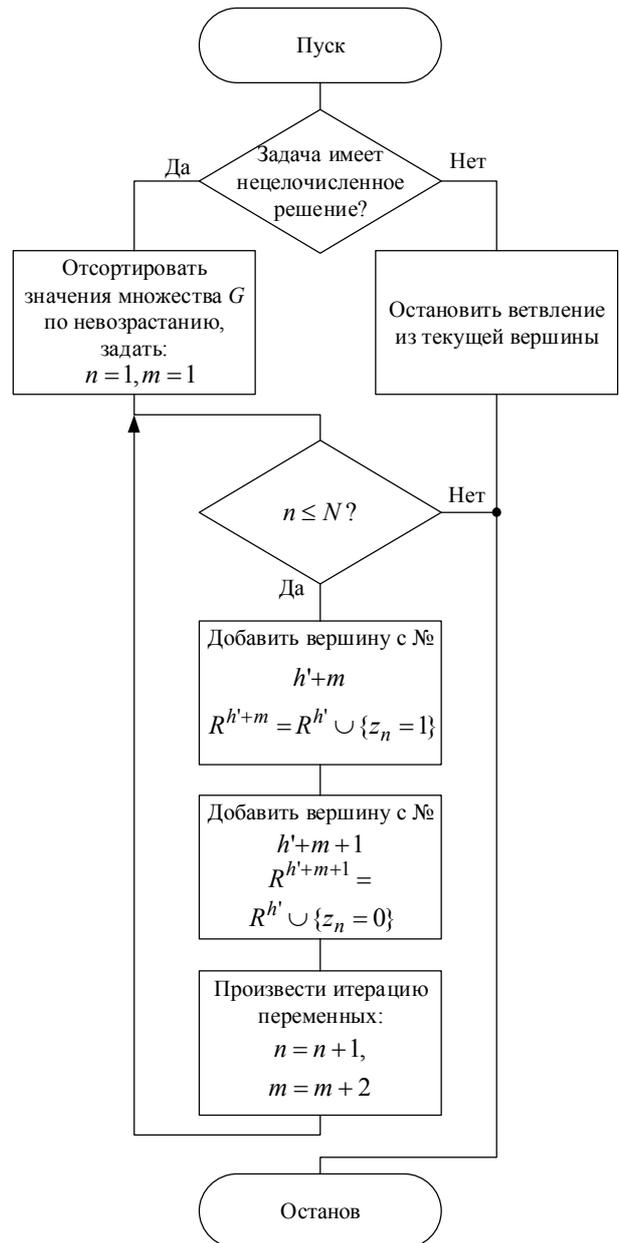


Рис. 5. Структурная схема процедуры ветвления

Процедура выбора оптимального результата (рис. 1 - блок 11) предназначена для выбора наилучшего рекорда в случае, если было обнаружено несколько рекордов, и предоставления альтернативных вариантов решения задачи.

Пример работы модифицированного алгоритма ветвей и границ

Рассмотрим пример работы модифицированного алгоритма ветвей и границ. Для упрощения вычислений, допустим, что затраты на исключение объектов из состава системы d_{ij} , $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ равны нулю. Тогда вторым компонентом критерия минимизации (1) можно пренебречь и задачу можно представить в виде стандартной задачи о размещении.

Пусть имеются три объекта размещения и три доступных территории, тогда $I = 3, J = 3$. Стоимости размещения каждого объекта на каждой территории заданы табл. 1.

Таблица 1
Стоимости размещения объектов в зависимости от территории

	1	2	3	4
Территория\объект	u_1	u_2	u_3	
l_1	40	60	80	
l_2	41	69	68	
l_3	49	68	55	

Ценности территорий размещения заданы табл. 2.

Таблица 2
Ценность территорий размещения

	1	2	3	4
Территория	l_1	l_2	l_3	
Ценность размещения	600	1000	800	

Тогда решение поставленной задачи с помощью модифицированного алгоритма ветвей и границ может быть представлено в виде таблицы 3. Где в колонке 1 записан номер вершины, в колонке 2 – номер родительской вершины.

Колонка 3 содержит информацию о том, какое дополнительное условие было добавлено в текущей вершине. Решение, полученное в каждой вершине учитывает все родительские условия и условие, добавленное в текущей рассматриваемой вершине.

Колонка 4 содержит решение полученное с помощью применения метода Гомори при ограничениях данной вершины $Z^h = \{z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{21}, z_{22}, z_{23}, z_{31}, z_{32}, z_{33}\}$, $h = \overline{1, H}$.

Колонка 5 содержит информацию о том, является ли полученное решение рекордом и будет ли оно добавлено в соответствующую таблицу.

После составления таблицы рекордов и сопоставления значений критерия очевидно, что минимальное значение критерия $\min_{z \in R^h} f(z) = 109$

достигается при значении вектора решений $Z^3 = \{0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0\}$ в вершине под номером 3.

Таблица 3

Таблица решения с помощью модифицированного алгоритма ветвей и границ

1	2	3	4	5
Номер вершины	Номер родителя	Введенное ограничение	Вектор решения $Z^h = \{z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{21}, z_{22}, z_{23}, z_{31}, z_{32}, z_{33}\}$	Является рекордом
1			{1,0,0,0,5,0,0,1,0,0}	
2	1	$z_{21} = 1$	{0,0,0,1,0,0,0,0,9,0}	
3	2	$z_{32} = 1$	{0,0,0,1,0,0,0,1,0}	Да
4	2	$z_{32} = 0$	{0,0,1,1,0,0,0,0,0,125}	
5	4	$z_{33} = 1$	{0,0,0,125,1,0,0,0,0,1}	
6	5	$z_{13} = 1$	{0,0,1,1,0,0,0,0,1}	Да
7	5	$z_{13} = 0$	{1,0,0,1,0,0,0,0,1}	Да
8	4	$z_{33} = 0$	{0,0,1,1,0,0,0,17,0,0}	
9	8	$z_{31} = 1$	{0,0,0,375,1,0,0,1,0,0}	
10	9	$z_{13} = 1$	{0,0,1,1,0,0,1,0,0}	Да
11	9	$z_{13} = 0$	{1,0,0,1,0,0,1,0,0}	Да
12	8	$z_{31} = 0$	{0,0,5,0,5,1,0,0,0,0}	
13	1	$z_{21} = 0$	{1,0,0,0,0,3,0,1,0,0}	
14	13	$z_{22} = 1$	{0,0,0,0,1,0,0,0,5,0}	
15	14	$z_{32} = 1$	{0,0,0,0,1,0,0,1,0}	Да
16	14	$z_{32} = 0$	{0,0,0,625,0,1,0,0,0,0}	
17	16	$z_{13} = 1$	{0,0,1,0,1,0,0,0,0}	
18	16	$z_{13} = 0$	{0,0,0,0,1,0,0,0,0,625}	
19	18	$z_{33} = 1$	{0,0,0,0,1,0,0,0,1}	Да
20	18	$z_{33} = 0$	{1,0,0,0,1,0,1,0,0}	Да
21	13	$z_{21} = 0$	{0,0,0,0,0,0,875,0,0,1}	
22	21	$z_{23} = 1$	{0,0,0,0,0,1,0,0,7,0}	
23	22	$z_{31} = 1$	{0,0,0,0,0,1,0,1,0}	Да
24	22	$z_{31} = 0$	{0,0,0,875,0,0,1,0,0,0}	
25	21	$z_{23} = 0$	{0,5,0,0,5,0,0,0,0,0,1}	
26	25	$z_{13} = 1$	{0,0,1,0,0,0,0,5,0,0,5}	
27	26	$z_{32} = 0$	{0,0,1,0,0,0,0,0,0,88}	
28	26	$z_{33} = 1$	{0,0,1,0,0,0,0,0,1}	Да
29	26	$z_{33} = 0$	{0,0,1,0,0,0,0,75,0,25,0}	
30	29	$z_{32} = 1$	{0,0,1,0,0,0,0,1,0}	Да
31	25	$z_{13} = 0$	{0,75,0,25,0,0,0,0,0,0,1}	
32	31	$z_{12} = 1$	{0,1,0,0,0,0,0,5,0,0,25}	
33	32	$z_{32} = 0$	{0,1,0,0,0,0,0,0,001,0,624}	

Заключение

Предложенный модифицированный алгоритм ветвей и границ может служить решения задач

линейной оптимизации, что было показано на примере решения задачи о размещении. Достоинством данного алгоритма является то, что он позволяет получить решение в виде глобального экстремума при уменьшении числа шагов алгоритма ветвей и границ.

Результаты сравнения быстродействия предложенного модифицированного алгоритма, с генетическим алгоритмом и стандартным алгоритмом ветвей и границ, рассмотренные в работах [10,16] позволяют судить о его эффективности при увеличении размерности задачи.

Литература

1. Елизаров, Д.Э. Обобщенная оптимизационная модель развития мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - №3. - С 28-30.

2. Елизаров, Д.Э. Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания населения [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - № 4. – С. 20-23.

3. Мосалов, С.В. Модели оптимального распределения ресурсов в вертикально организованных производственных системах [Текст] / С.В. Мосалов, В.Л. Бурковский // Системы управления и информационные технологии. - 2006.-Т. 25. - № 3.1. - С. 167-170.

4. Бурковский, В.Л. Имитационное моделирование и оптимизация сетей массового обслуживания на основе эволюционных методов [Текст]: монография / В.Л. Бурковский, С.В. Титов, А.В. Бурковский. – Воронеж: ВГТУ, 2007. - 153с.

5. Попов, К.М. Алгоритмизация управления процессами принятия решений в условиях развивающихся сетей регионального электроснабжения [Текст] / К.М. Попов, Шукур Омар Шукур Махмуд, В.Л. Бурковский // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2014. - № 2. - С. 55-59.

6. Бурковский, В.Л. Модели оптимального энергораспределения в системах регионального энергопотребления [Текст]: монография / В.Л. Бурковский, Р.А. Харченко. – Воронеж: ВГТУ, 2006. – 137с.

7. Бурковский, В.Л. Анализ развивающихся информационных систем на основе аппарата моделирования и оптимизации [Текст]: монография / В.Л. Бурковский, И.М. Матвиенко, А.В. Бурковский. – Воронеж: ВГТУ, 2009. - 136с.

8. Елизаров, Д.Э. Динамические модели оптимизаций структуры мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сб. тр. VIII междунар. науч. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2015. - С. 130-132.

9. Елизаров, Д. Э. Модель оптимального развития структуры мультисервисных сетей на основе аппарата динамического программирования [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016.-Т. 12. - №1. - С 21-24.

10. Елизаров, Д.Э. Модифицированная модель задачи о размещении и алгоритм ее численной реализации на основе аппарата дискретного программирования [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сб. тр. IX междунар. науч. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2016. - С. 135-138.

11. Ху, Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях [Текст] / Т. Ху. - М.: Мир, 1974. - 520 с.

12. Корбут А. А. Дискретное программирование [Текст] / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 367 с.

13. Jünger, M. 50 Years of integer programming 1958-2008: From the early years to the state-of-the-art. [Текст] / M. Jünger, Th.M. Lieblich, D. Naddef, G.L. Nemhauser, (Eds.). – Springer Science & Business Media, 2009. – 797 с.

14. Елизаров, Д.Э. Алгоритмизация решения задачи динамической оптимизации структуры мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - №6. - С 59-61.

15. Елизаров, Д.Э. Алгоритм решения задачи оптимального размещения узлов обслуживания в условиях развивающихся мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016.-Т. 12. - №3. - С 4-7.

16. Елизаров, Д.Э. Программное обеспечение моделей оптимального развития структуры мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Современные технологии в науке и образовании: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. – Рязань: РГРУ, 2016. - Т.2. - С 63-67.

Воронежский государственный технический университет

ALGORITHMIZATION THE PROBLEM OF PLACEMENT SOLUTION ON THE BASIS OF BRANCH AND BOUND METHOD MODIFICATION

D.E. Elizarov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: elizarovdm@list.ru

The article describes generalized mathematical model of the placement problem in conditions of complex-structured technical systems under development. The advantage of the model is an ability of its application for the systems with already formed structure.

Offers an algorithm of the placement problem model's implementation, which is based on modification of branch and bound method. The algorithm includes a procedure of Gomory method, which is used to form the solution graph and table of records for each iteration of calculation cycle. The structural scheme of the algorithm is also considered, including detailed description of each internal procedure. The designed algorithm is intended to solve discrete programming problems by iterative

application of Gomory's method. The solution results, which are obtained in each iteration of calculation cycle, will form the table of records, if they satisfy an integrality condition. In other case, they will form the solution graph with adding of new integrality restrictions. The mechanism of alfa-beta pruning is included to the modified branch and bound algorithm to avoid calculation in excess and accelerate the calculation. Presented an example of the practical implementation of the algorithm for the static placement problem with 3x3 dimension.

The developed placement model and the algorithm of its particular implementation could be applied in conditions for solving the development problems of different kinds of complex-structured technical systems, which include informational, industrial and energy systems

Key words: mathematical modeling, discrete programming, optimization

References

1. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L., Voropaev A.P. Obobshhennaja optimizacionnaja model' razvitija mult'iservisnyh setej [Generalized optimization model of multi-service networks] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015.-vol. 11, - No. 3. – pp. 28-30.
2. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Optimizacionnye modeli formirovaniya struktury razvivajushhihsja mult'iservisnyh setej informacionnogo obsluzhivaniya naselenija [Optimization models of structure formation in developing multi-service networks of information services to the population] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015. - vol. 11. – No. 4. – pp. 20-23.
3. Mosalov S.V., Burkovskiy V.L. Modeli optimalnogo raspredeleniya resursov v vertikalno organizovannyh proizvodstvennyh sistemah [Models of optimal allocation of resources in a vertically organized production systems] // Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii. - 2006.-vol. 25. – No. 3.1. - pp. 167-170.
4. Burkovskiy V.L., Titov S.V., Burkovskiy A.V. Imitatsionnoe modelirovanie i optimizatsiya setey massovogo obsluzhivaniya na osnove evolyutsionnyh metodov [Simulation and optimization of queuing networks based on evolutionary methods]: monograph / Voronezh: VSTU, 2007. – 153 p.
5. Popov, K.M. Algoritmizatsiya upravleniya protsessami prinyatiya resheniy v usloviyah razvivayushchihsja setey regionalnogo elektrosnabzheniya [Process control algorithmic decision-making in the context of developing a regional electricity networks] / K.M. Popov, Shukur Omar Shukur Mahmud, V.L. Burkovskiy // Elektrotehničeskie kompleksi i sistemy upravleniya. - 2014. – No. 2. - pp. 55-59.
6. Burkovskiy, V.L. Modeli optimalnogo energoraspredeleniya v sistemah regionalnogo energopotrebleniya [Models of optimal power distribution systems of regional power]: monograph / V.L. Burkovskiy, R.A. Harchenko. – Voronezh: VSTU, 2006. – 137p.
7. Burkovskiy V.L., Matvienko I.M., Burkovskiy A.V. Analiz razvivayushchihsja informatsionnyh sistem na osnove apparata modelirovaniya i optimizatsii [Analysis of developing information systems based on modeling and optimization of the machine]: monograph. – Voronezh: VSTU, 2009. – 136p.
8. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Dinamicheskie modeli optimizatsiy struktury multiservisnyh setey [Dynamic optimization model of multi-network structure] // Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya i kompyuternykh tehnologiy – Voronezh: VSTU, 2015. - pp. 130-132.
9. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Model optimalnogo razvitiya struktury multiservisnyh setey na osnove apparata dinamicheskogo programmirovaniya [Model optimal development of the structure of multi-service networks based on dynamic programming unit] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2016.-vol. 12. – No.1. – pp. 21-24.
10. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Modifitsirovannaya model zadachi o razmeschenii i algoritm ee chislennoy realizatsii na osnove apparata diskretnogo programmirovaniya [A modified model of the deployment tasks and the algorithm of its numerical implementation on the basis of discrete programming unit] // Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya i kompyuternykh tehnologiy – Voronezh: VSTU, 2016. - pp. 135-138.
11. Hu T. Tselochislennoe programmirovaniye i potoki v setyah [Integer programming and network flows]. - M.: Mir, 1974. - 520 p.
12. M. Jünger, Th.M. Liebling, D. Naddef, G.L. Nemhauser, (Eds.). Finkel'shtejn Ju.Ju. Diskretnoe programmirovaniye [Discrete programming] – M.: Nauka, 1969. – 367 p.
13. Jünger, M. 50 Years of integer programming 1958-2008: From the early years to the state-of-the-art. – Springer Science & Business Media, 2009. – 797 p.
14. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Algoritmizatsiya resheniya zadachi dinamicheskoy optimizatsii struktury multiservisnyh setey [Algorithmic solution of dynamic optimization of multi-network design problems] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015.-vol. 11. – No.6. – pp. 59-61.
15. Elizarov, D.E. Algoritm resheniya zadachi optimalnogo razmescheniya uzlov obsluzhivaniya v usloviyah razvivayushchihsja multiservisnyh setey [An algorithm for solving the problem of optimal placement of service nodes in a developing multi-service networks] / D.E. Elizarov, V.L. Burkovskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2016.-vol. 12. – No.3. – pp. 4-7.
16. Elizarov D.E., Burkovskiy V.L. Programmnoye obespecheniye modeley optimalnogo razvitiya struktury multiservisnyh setey [Software development of an optimal model of multi-network structure] // Sovremennyye tehnologii v nauke i obrazovanii. – Ryazan: RSRU, 2016. - vol.2. – pp. 63-67.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Э.Э. Чигбу, К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский

В статье рассматриваются анализ и моделирование динамики потенциально опасных процессов на производственных объектах, как сложной нелинейной системы на основе аппарата нейронных сетей. Проводится анализ взаимосвязи опасных факторов, приводящих к критическим изменениям динамики потенциально опасных процессов, с различной природой возникновения. В условиях постоянно увеличивающегося промышленного производства задача прогнозирования динамики потенциально опасных процессов является наиболее актуальной для повышения безопасности на объектах и уменьшения рисков для человека и окружающей среды. Прогнозирование динамики потенциально опасных процессов позволит не только повысить текущий уровень безопасности на производственных объектах, но и предложит возможность комплексного подхода к безопасности на стадии разработки проектной документации.

В условиях многокритериальности поставленной задачи, а также наличия выраженных нелинейных свойств у исследуемых объектов для решения задачи прогнозирования динамики потенциально опасных процессов предлагается использовать аппарат нейросетевого моделирования. Используется не классическая нейронная сеть, а нейронно-нечёткий модуль, объединяющий преимущества как нейронной сети, так и аппарата нечёткой логики. На уровне модели предлагается модернизация архитектуры модуля и предобработка сигнала для повышения качества прогноза. В результате предложенные процедуры повышения качества функционирования модели показали свою эффективность при прогнозировании динамики потенциально опасных процессов

Ключевые слова: потенциально опасный процесс, нейронная сеть, нечёткая система

Введение

Аварии последних десятилетий закономерно приводят к выводу: двигаясь по пути технического прогресса человек, подвергает себя все большему риску. Благодаря совершенствованию техносферы и медицины средняя продолжительность жизни человека значительно увеличилась. Созданная для защиты человека от внешних воздействий, в наше время техносфера становится источником опасности: растет мощность промышленных установок, усложняются технологии, возрастает влияние предприятий друг на друга, работа оборудования все больше зависит от действий персонала, управляющего им. Риск и масштаб аварий значительно возросли.

Необходимы меры по защите человека и окружающей среды от опасностей, порождаемых техносферой - аварий на опасных производственных объектах. Эти меры значимы на протяжении всего жизненного цикла производственного объекта, но особенно - на стадии его проектирования. Так как именно на этом этапе можно добиться значительного повышения безопасности объекта без существенного увеличения его стоимости. Обычно уровень

опасности объекта, функционирующего в штатном, предусмотренном проектом режиме, несравненно ниже уровня опасности, который представляет объект в условиях аварийной ситуации. Соответственно, и оценки аварийного риска обычно имеют большие значения, чем оценки риска от того же объекта, функционирующего в штатном режиме. Различие оценок обычно бывает настолько большим, что именно оценки аварийного риска принимаются за меру уровня опасности, порождаемой производственным объектом.

Если проанализировать различные аварии на особо опасных объектах, можно выделить ряд общих причин: ошибки в проектах, неправильные решения о месте постройки объекта и режимах их эксплуатации, недооценка подготовки персонала, халатность и беспечность. Но анализ случившихся аварий не решает всех проблем. Необходимо не только находить «слабые звенья» в технологических цепочках, но и предсказывать, как будут развиваться события, вызванные аварией на опасных производственных объектах, указывать, как добиться уменьшения их последствий [1].

На смену технике безопасности - своду правил работы с техникой - должна прийти теория безопасности, или теория риска. Имея дело со сложными системами, теория риска не стремится проконтролировать все возможные аварии на объекте, поскольку рассмотреть все варианты не возможно, но стремится предотвратить события, приводящие к тяжелым ава-

Чигбу Эдзие Энтони – ВГТУ, аспирант, e-mail: tonychiegbu@yahoo.com

Гусев Константин Юрьевич – ВГТУ, канд. техн. наук, старший преподаватель, e-mail: gussev_konstantin@mail.ru
Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: emses@mail.ru

риям на производстве. Различают следующие методы определения величины риска:

- статистический, опирающийся на статистическую обработку данных об авариях;

- модельный, строящий модели воздействия вредных факторов на человека и окружающей среды, которые могут описывать как последствия обычной работы предприятия, так и ущерб от аварий на особо опасных производствах [2];

- экспертный, основанный на оценке вероятности аварии на опасных производственных объектах не по данным вычислений, а по мнению опытных экспертов;

- социологический, основанный на определении уровня опасности по результатам социологических опросов больших групп людей.

При определении риска, как правило, используются одновременно несколько методов [3].

Математическая модель

Во всех сколько-нибудь сложных системах присутствуют свойства, которые поддаются описанию с помощью нелинейных моделей, и для них естественны: ограниченность решений, колебательные и мультистационарные режимы, квазистохастическое пространственное и временное поведение. С учетом свойств, присущих сложным системам, необходимо перейти к нелинейному принципу, который более адекватно подходит к моделированию современных технических, технологических, информационных и социально-экономических систем.

Динамику возникновения опасных факторов на производстве можно отнести к динамике функционирования нелинейных объектов и, как следствие, в статье предлагается анализ и моделирование возникновения опасных факторов основе системы с нейронно-нечеткой логикой.

Структурно гибридная модель нечётко-нейронного модуля описывается выражением

$$y(t+1) = \frac{\sum_{k=1}^N y_m \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{u - \bar{x}_i^k}{S_i^k} \right)^2 \right]}{\sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{u - \bar{x}_i^k}{S_i^k} \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

или, представляется в качестве модели типа «чёрный ящик», реализующую функцию f

$$y(t+1) = f(u_j). \quad (2)$$

Для оценки точности функционирования модели прогнозирования вводятся параметры качества [4]:

- погрешность на выходе модуля – разность между эталонным и выходным значением модуля, абсолютная величина:

$$e = d - y(t+1); \quad (3)$$

- среднеквадратическая ошибка (мера погрешности) – функция погрешности, возведённая в квадрат, дифференцируемая функция:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (d - y)^2; \quad (4)$$

- доля периодов процесса, в которых прогнозируемое изменение (увеличение или уменьшение) и действительное изменения состояния экономического показателя (тренда) совпадают, измеряется в процентах:

$$z = \frac{K_p}{K_e} * 100\%, \quad (5)$$

где K_p – количество временных периодов, в которых наблюдается совпадение изменений, K_e – общее количество временных периодов прогнозируемых показателей.

Введём обозначения элементов нейронной сети. Пусть на вход нейронной сети поступают дискретные значения, которые представим в виде вектора

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (6)$$

или, если представить каждое входной значение в виде элемента дискретного временного ряда,

$$u = (y(t), y(t-2), \dots, y(t-n)), \quad (7)$$

где n – количество входов нейросетевой модели.

Первым этапом функционирования данной модели является составление из обучающей выборки базы знаний в виде пар «входной вектор»-«прогнозируемое значение». Данные в базе знаний сохраняются не в абсолютных значениях, а в виде функций принадлежности к соответствующим гауссовым кривым [5].

На втором этапе, используя сформированную базу знаний, составляется прогноз, путём вычисления степени принадлежности имеющейся ситуации и эталонной. Нечёткая система даёт возможность вычисления результата несколькими способами, в частности:

- прямое нахождение ситуации в базе знаний, имеющей наибольшую степень принадлежности к входной. Результатом является

совпавшее с найденной ситуацией «прогнозируемое значение»;

- вычисление результата по формуле

$$y = \frac{\sum y_i \cdot v_i}{\sum v_i}; i = 1 \dots n. \quad (8)$$

При вычислении прогнозируемого значения рассчитываются показатели качества осуществлённого прогноза. Непосредственно на вход нечёткой системы поступает массив изменений показателя в каждый момент времени:

$$B_i = A_{i+1} - A_i; i = 1 \dots n, \quad (9)$$

Где A - матрица значений, B – изменение значения в момент времени i .

Результаты функционирования модели представлены на рис. 1.

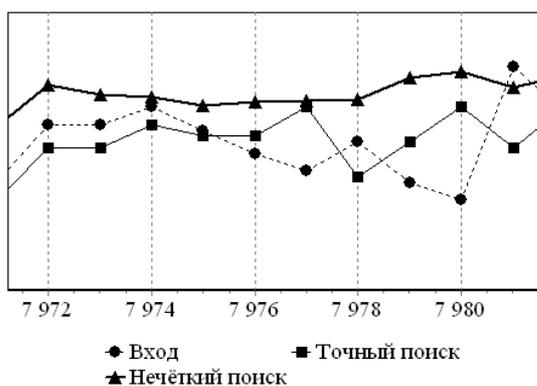


Рис. 1. Результаты функционирования нечёткой модели

Архитектура нечётко-нейронного модуля

Представив нейронную сеть в виде графа (рис. 2), вершинами которого являются функциональные модули, отметим наличие множества внутренних связей. Связи между слоями L1 и L2 являются наиболее значимыми при обучении нейронной сети и процессе функционирования.

Формализуем внутренние связи нейронной сети в виде двумерного бинарной матрицы:

- «1» - связь присутствует;
- «0» - связь отсутствует.

Такое представление упрощает процесс модификации внутренних связей для оптимизации скорости и точности функционирования системы. Поскольку задача поиска оптимальной матрицы внутренних связей многоэкстремальная и многокритериальная, что осложняет поиск глобального экстремума среди множе-

ства локальных. Предлагается использовать метод перебора (равномерного поиска) и генетический алгоритм для решения поставленной задачи. Выбор метода равномерного поиска не случаен, поскольку, не смотря на потраченные в процессе оптимизации ресурсы, будет найден глобальный экстремум. Применение данного метода предложено для проверки функционирования генетического алгоритма на определённом этапе оптимизации.

Проектирование архитектуры нейронно-нечёткого модуля состоит из следующих шагов [9] (в соответствии с типовым циклом эволюции):

Шаг 1. Декодирование каждой особи текущей популяции для описания архитектуры модуля.

Шаг 2. Обучение каждого модуля с архитектурой, полученной на первом шаге, с помощью заранее заданного правила (некоторые его параметры могут адаптивно уточняться в процессе обучения). Обучение должно начинаться при различных случайно выбираемых начальных значениях весов и параметров правила обучения.

Шаг 3. Оценивание приспособленности каждой особи по достигнутым результатам обучения, то есть по наименьшей целой среднеквадратичной погрешности обучения либо на основе тестирования, если наибольший интерес вызывает способность к обобщению, наименьшая длительность обучения или упрощение архитектуры (минимизация количества нейронов и связей между ними).

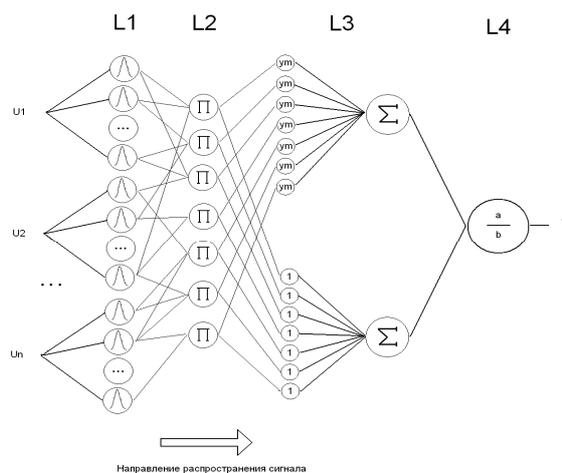


Рис. 2. Структура модуля

Шаг 4. Репродукция особей с вероятностью, соответствующей их приспособленности

или рангу в зависимости от использования метода селекции.

Шаг 5. Формирование нового поколения в результате применения таких генетических операторов, как скрещивание, мутация и/или инверсия.

Для повышения точности моделирования предлагается ввести пробные шаги внутри одной итерации по аналогии с двухшаговым методом наименьших квадратов [6].

В качестве пробного шага искусственно включим в уравнение функционирования нейронной сети промежуточную переменную $y(t+h)$:

$$y(t+1) = f(u_y), \quad (10)$$

$$u_y = (y(t+h), u_1, u_2, \dots, u_{n-1}),$$

где $h = 0 \dots 1$ - величина пробного шага.

Процесс прогнозирования предлагается разделить на два этапа:

- на первом этапе находится промежуточная переменная $y(t+h)$, как выходная величина нейросетевой модели, на которую подаются значения вектора u .

Если временной интервал поступления информации в нейронную сеть меньше требуемого временного интервала прогноза, то после расчёта промежуточной переменной $y(t+h)$ появляется возможность корректировки прогноза у посредством нахождения погрешности прогноза и «дообучения» нейронной сети:

$$\varepsilon = y(t+h) - d(t+h). \quad (11)$$

- на втором этапе формируется новый вектор u_y с учётом полученного значения и подаётся на вход нейронной сети.

Заметим, что при $h=1$ выполняется 2 идентичных друг другу шага прогнозирования, а при $h = 0$ первый шаг является неэффективным. Таким образом, для эффективности ме-

тода h должно быть выбрано в пределах $[0,25 \dots 0,75]$.

Обучение нейросетевой модели на обучающей выборке происходит в течении 200 эпох.

Заключение

Проведённый анализ опасных факторов на производственных объектах, определил основные проблемы данной предметной области. В результате, разработан нечетко нейронный модуль для моделирования динамики нелинейных объектов на основе численных методов и аппарата нечёткой логики, обеспечивающих высокое качество и точность моделирования.

Литература

1. Безбородова, О. Е. Теория риска для управления качеством окружающей среды [Текст] : учеб. пособие по курсу "Упр. охраной окружающей среды" / О.Е. Безбородова. - Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. - 95 с.
2. Ткалич, С.А. Оптимальное календарное планирование работ в системе безаварийного управления АЭС [Текст] / С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - №. 3. - С. 16-20.
3. Гусев, П.Ю. Имитационное моделирование производства деталей из полимерных композиционных материалов [Текст] / П.Ю. Гусев, М.И. Чижов, Ю.С. Скрипченко // Компьютерные исследования и моделирование. - 2014. - Т. 6. - №. 2. - С. 245.
4. Бурковский, В. Л. Моделирование динамики нелинейных объектов на основе нечёткой нейронной сети [Текст] / В.Л. Бурковский, К.Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - №3-1. - С. 13-17.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского [Текст] / Д. Рутковская, Л. Рутковский, М. Пилиньский. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003. - 384 с.
6. Ярушкіна, Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем [Текст] / Н.Г. Ярушкіна - М. : Финансы и статистика, 2004. - 320 с.

Воронежский государственный технический университет
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж

PREDICTION OF THE DYNAMICS OF POTENTIALLY DANGEROUS PROCESSES ON THE BASIS OF NEURAL NETWORK MODELING

E. A. Chigbu – Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: tonychiegbu@yahoo.com

K. Yu. Gusev – Candidate of Engineering Sciences, Senior lecturer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: gussev_konstantin@mail.ru

V.L. Burkovsky – Doctor of engineering Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: emses@mail.ru

The article deals with the analysis and modeling of the dynamics of potentially dangerous processes in industrial objects, as a complex nonlinear system based on neural networks. The analysis of the relationship of threat factors leading to critical changes in the dynamics of potentially dangerous processes with different nature of appearance. In the conditions of constantly increasing industrial production the problem of forecasting the dynamics of potentially dangerous processes is the most relevant to improve safety and reduce risks to humans and the environment. Forecasting in tensile-hazardous processes will not only increase the current level of security at industrial facilities, but also offer the opportunity for an integrated approach to security in the development phase of the project documents.

In the context of multicriteria tasks, as well as the presence of pronounced non-linear properties of the studied objects to solve the problem of predicting the dynamics of potentially hazardous process it is proposed to use the apparatus the neural network modeling. Used not classical neural network, a neuron-fuzzy module that combines the benefits of both neural networks and fuzzy logic. At the level of the model proposed modernization of the architecture of the module and the signal preprocessing to improve the quality of the forecast. As a result, the proposed procedures improve the quality of the functioning of the model has shown its effectiveness in predicting the dynamics of potentially dangerous processes

Key words: potentially dangerous process, neural network, fuzzy system

References

1. Bezborodova, O. E. Teorija riska dlja upravljenija kachestvom okruzhajushhej sredy : ucheb. Posobie [The theory of risk management of environmental quality : a tutorial] . – Penza : Penz. state University, 2004. – 95 p.
2. Tkalic S. A., Burkovsky V. L. Optimal'noe kalendaroe planirovanie rabot v sisteme bezavarijnogo upravljenija AJeS [Optimal scheduling system for trouble-free plant control] // Herald of the Voronezh state technical University. – 2016. – Vol. 12. no. 3. – P. 16-20.
3. Gusev Y. P., Chizhov M. I., Skripchenko S. Yu. Imitacionnoe modelirovanie proizvodstva detalej iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Simulation modeling of production of parts made of composite materials] // Computer research and modeling. – 2014. – T. 6. no. 2. – P. 245.
4. Burkovsky V. L., Gusev, Y. K. Modelirovanie dinamiki nelinejnyh ob#ektov na osnove nechjotkoj nejronnoj seti [Modeling the dynamics of nonlinear objects by fuzzy neural network] // Herald of Voronezh state technical University. – 2014. – T. 10. – No. 3-1. – S. 13-17.
5. Rutkowski D., Rutkowski L., Pilinski M. Nejrornyie seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]: translated from Polish by I. D. Rudinsky.– M. : Hot line-Telecom, 2003. – 384 p.
6. Yarushkina N. G. Osnovy teorii nechetkih i gibridnyh system [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems] .– M. : Finance and statistics, 2004. – 320 p.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДВИГАТЕЛЕЙ 14Д23 И РД0124А

С.М. Пасмурнов, Д.Ю. Якуш

Задача обеспечения поддержания значений давления в рабочей камере при проведении огневых испытаний и соотношений компонентов топлива является важной задачей при поставках двигателей в эксплуатацию. В статье описан процесс реализации поддержания давления в камере сгорания и соотношения компонентов топлива двигателей 14Д23 и РД0124А с повышенной точностью при помощи системы аварийной защиты и управления. Для этого предлагается осуществить доработку системы аварийной защиты и управления. Работы предлагается вести с учетом реализации первоочередной задачи – обеспечения защиты двигателя и стенда при огневых испытаниях. Доработка системы аварийной защиты и управления осуществлялась с требованием минимизации риска срыва заданной циклограммы и формирования ложной команды. При реализации режима с обратной связью, особенно при требованиях многочисленных изменений режимов, необходима тщательная отладка взаимодействия ядра системы защиты и системы управления. Такая отладка возможна лишь при проверках с использованием тестовой модели двигателя, учитывающей влияние на параметры двигателя углов привода регулятора и дросселя. Структурная схема отладки взаимодействия системы управления и программы контроля и управления системы аварийной защиты представлена в статье. Для повышения качества тестирования в рамках подготовки к огневым испытаниям с поддержанием системой аварийной защиты и управления показателей реализовано моделирование отклика двигателя на изменение углов приводов дросселя и регулятора. Отмечены основные результаты данной работы

Ключевые слова: система аварийной защиты и управления, программно-математическое обеспечение, алгоритм, жидкостные ракетные двигатели

Введение

Для обеспечения контроля качества изготовления двигателей 14Д23 и РД0124А при поставках в эксплуатацию на этапе серийного производства возникла задача: обеспечить при проведении огневых испытаний (ОИ) поддержание значений давления в камере (Рк) и соотношения компонентов топлива (Км) с повышенной точностью. Предпусковая настройка двигателя и точность установки приводов дросселя и регулятора на расчетный угол при переключках не позволяли обеспечить требуемую точность поддержания Рк и Км в процессе проведения испытаний. Реализацию данной задачи было решено осуществить с помощью системы аварийной защиты и управления (САЗУ).

Постановка задачи

Доработка САЗУ для выполнения функции поддержания требуемых значений Рк и Км осуществлялась впервые и осуществлялась с применением унифицированных алгоритмов. Работы велись с учетом реализации первоочередной задачи – обеспечение защиты двигателя и стенда при ОИ. Доработка САЗУ осуществлялась с требованием минимизации риска срыва заданной циклограммы и формирования ложной команды аварийного выключения двигателя (АВД), что достигалось благодаря выполнению условий:

1. неизменности базового программно-математического обеспечения (ПМО) основной работы (ОР) САЗУ;

2. неизменности части версии настройки алгоритмов (ВНА), реализующей функции аварийной защиты;

3. расширение функций управления в ВНА, реализовывалось без изменения ранее применявшихся алгоритмов управления.

На начальном этапе реализации процедуры поддержания требуемых значений по Рк и Км были проведены экспериментальные работы по определению минимальных скоростей устойчивого вращения приводов дросселя и регулятора, для точного вычисления массовых расходов введены в телеметрический кадр (ТМК) САЗУ дополнительные параметры температура окислителя в расходной магистрали (ТОРМ) и температура горючего в расходной магистрали (ТГРМ), проведены работы по отладке взаимодействия САЗУ и системы управления (СУ) стенда при решении задачи поддержания требуемых Рк и Км.

Погрешность измерения параметра ДГФК датчиками типа ДД-КМ не позволяла осуществлять требуемую точность поддержания Рк, т. к. их основная погрешность составляет 1,5%. При оценке двигателя используются точные замеры параметра ДГФК, выполняемые датчиками типа ПДВ (погрешность измерения в зависимости от класса точности составляет 0,4% или 0,25%). Однако они имеют в 2 раза большую постоянную времени по сравнению с датчиками типа ДД-КМ, а кроме того размещены на стенде. Инерционность замеров, полученных при использовании стендовых датчиков типа ПДВ, не позволяет осуществлять эффективное управление по параметру ДГФК. Дополнительный анализ выявил при использовании управления по ДГФК необходимость учета изменения перепада давления на форсунках, вызванного как изменением режима

Пасмурнов Сергей Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: smpasmurnov@mail.ru
Якуш Дмитрий Юрьевич – ВГТУ, аспирант; АО КБХА, ведущий конструктор, e-mail: duyakush@mail.ru

Рк, так и учетом изменения с течением времени ОИ сопротивления форсунок горючего вследствие процесса конденсации на их поверхности твердых частиц, образующихся при взаимодействии жидкого компонента с горячим газом. По этой причине в ПМО ОР САЗУ была реализована процедура определения Рк по расходам компонентов двигателя, позволяющая повысить точность его поддержания.

$$P_k = m_k \cdot C^* / k \cdot F_{кр}, \quad (1)$$

$$K_m = G_o / G_f, \quad (2)$$

где: $m_k = G_o + G_f$ - массовый расход компонентов топлива (окислителя и горючего);

C^* - характеристическая скорость, $C^* = f(K_m)$;

k - коэффициент, учитывающий соотношение между давлением на входе в сопло и давлением в плоскости смесительной головки;

$F_{кр}$ - сумма площадей критических сечений камер сгорания двигателя.

Управляя значением G_o при помощи дросселя (Dp) и значением G_f - при помощи регулятора (Pg) осуществляем поддержание необходимых P_k и K_m

При реализации режима с обратной связью по P_k и K_m , особенно при требованиях ко множеству переключений с различными уровнями режимов, необходима тщательная отладка взаимодействия ядра САЗУ и СУ. Такая отладка возможна лишь при проверках с использованием тестовой модели двигателя, учитывающей влияние на параметры двигателя углов привода регулятора и дросселя.

Основная задача, решаемая средствами отладки алгоритмов регулирования с использованием модели двигателя, - отработка взаимодействия систем, получение предварительных параметров управления (порогов принятия решения, скорости переключения и т. д.), обеспечивающих устойчивость режимов работы двигателя при ограничениях на время и точность позиционирования приводов. Для обеспечения тестирования взаимодействия СУ и ядра САЗУ была разработана модель двигателя, имитирующая его отклик на управление по P_k и K_m .

Основная особенность данной модели заключается во введении коррекции значений параметров двигателя, задействованных в алгоритмах САЗУ и получаемых из тестовых текстовых файлов путем интерполяции между заданными временными контрольными точками. Коррекция заключается в изменении полученных значений параметров с учетом влияния отклонения значений углов приводов дросселя и регулятора от номинала и осуществляется по формулам:

$$DP_k = DP_k[j] = DP_k[j-1] \cdot (T_{reg} - 1) / T_{reg} + A^* (REG_{cur} - REG_{nom}) / [K_{reg} \cdot T_{reg}], \quad (3)$$

$$DK_m = DK_m[j] = DK_m[j-1] \cdot (T_{dr} - 1) / T_{dr} + A^* (DR_{cur} - DR_{nom}) / [K_{dr} \cdot T_{dr}], \quad (4)$$

где $DP_k[j]$ - отклонение режима работы двигателя по P_k на j - ом такте, определенное как функция положения регулятора;

$DK_m[j]$ - отклонение режима работы двигателя по K_m на j - ом такте, определенное как функция положения дросселя;

T_{reg} - постоянная времени отклика двигателя на изменение положения регулятора;

T_{dr} - постоянная времени отклика двигателя на изменение положения дросселя;

REG_{cur} - последнее значение угла привода регулятора, полученное из СУ;

DR_{cur} - последнее значение угла привода дросселя, полученное из СУ;

REG_{nom} - номинальное (на режиме настройки) значение угла привода регулятора;

DR_{nom} - номинальное (на режиме настройки) значение угла привода дросселя;

K_{reg} - коэффициент влияния (обратный) отклонения положения регулятора на режим работы двигателя по P_k ;

K_{dr} - коэффициент влияния (обратный) отклонения положения дросселя на режим работы двигателя по K_m ;

A - коэффициент масштабирования (вводимый для исключения потерь в точности при экспоненциальном сглаживании с постоянными времени T_{reg} , T_{dr}).

$$PAR_{cur}(N_{tmk}) = PAR_{int}(N_{tmk}) + DK_m[j] \cdot KK_m(N_{tmk}) + DP_k[j] \cdot KP_k(N_{tmk}), \quad (5)$$

где $PAR_{cur}(N_{tmk})$ - значение N_{tmk} -го параметра на текущем такте, которое заносится в ТМК САЗУ;

$PAR_{int}(N_{tmk})$ - значение N_{tmk} -го параметра на текущем такте, полученное при интерполяции между контрольными точками текстового тестового файла;

$KK_m(N_{tmk})$ - коэффициент зависимости изменения N_{tmk} -го параметра от изменения режима по K_m при переключении дросселя;

$KP_k(N_{tmk})$ - коэффициент зависимости изменения N_{tmk} -го параметра от изменения режима по P_k при переключении регулятора.

Перед началом проведения штатных проверок была выполнена отладка взаимодействия ПМО ОР САЗУ и СУ, позволившая обнаружить и устранить ряд ошибок в реализации программ. Данная работа осуществлялась с целью получения информации для настроек ВНА ПМО ОР САЗ и тестирования правильности взаимодействия составляющих функционального комплекса (ФК) САЗУ при подготовке к проведению многорежимных испытаний с реализацией обратной связи при поддержании K_m и P_k .

Основные инструменты тестирования взаимодействия СУ и САЗУ:

- базовое ПМО СУ;
- тестовая версия циклограмм СУ;
- версии циклограмм СУ в соответствии с программами изменения соотношения компонентов топлива и давления в камерах согласно требованиям КД;
- имитатор исполнительных органов двигателя 14Д23;
- диспетчер, доработанный под задачи тестирования;
- базовое ПМО САЗУ;

- тестовая ВНА ПМО ОР САЗУ;
- ВНА ПМО ОР САЗУ, разработанная в соответствии с требованиями КД;
- тестовый файл для моделирования параметров двигателя;
- файл с настройками по корректировке параметров двигателя в зависимости от положения регулятора и дросселя.

При проверке взаимодействия СУ и САЗУ решены следующие задачи:

1) проверена правильность функционирования диспетчера при коррекции параметров по значениям поступивших из СУ углов привода дросселя и регулятора (величина корректировки параметра, реализация требуемого времени отклика на изменение положения регулятора и дросселя);

2) осуществлена проверка взаимодействия СУ и САЗУ при различных циклограммах (программы изменения соотношения компонентов топлива и давления в камерах согласно требованиям КД);

3) протестировано взаимодействие СУ и САЗУ при различных настройках характеристик контура управления (скорости переключений дросселя и регулятора, постоянные времени отклика двигателя на изменение положения регулятора и дросселя, пороги срабатывания алгоритмов выработки команд из САЗУ в СУ) на предмет возникновения в нем колебаний.

Анализ результатов проведенных работ показал:

1) правильность функционирования диспетчера в режиме «Эмуляция системы измерения (СИ)»;

2) возможность проверки настроек и взаимодействия ПМО ОР САЗУ и ПМО СУ на соответствие требованиям КД (реализация многоуровневых режимов по Рк и Км);

3) подтверждены заданные скорости переключений дросселя и регулятора, постоянные времени отклика двигателя на изменение положения регулятора и дросселя, пороги срабатывания алгоритмов выработки команд из САЗУ в СУ, которыми необходимо руководствоваться при настройках ПМО ОР САЗУ для оптимизации (отсутствие автоколебаний контура управления двигателем, максимальность скорости переключений приводов дросселя и регулятора, точность поддержания Рк и Км) проведения ОИ двигателей 14Д23 и РД0124А;

4) возможность выполнения дополнительных требований задания на испытание по регулированию Рк и Км без обратной связи по САЗУ в случае отказа средств измерения.

Структурная схема отладки взаимодействия СУ и программы контроля и управления (ПКУ) САЗУ приведена на рис. 1. Результаты данных работ позволили уменьшить время, требуемое для подготовки САЗУ к испытаниям.

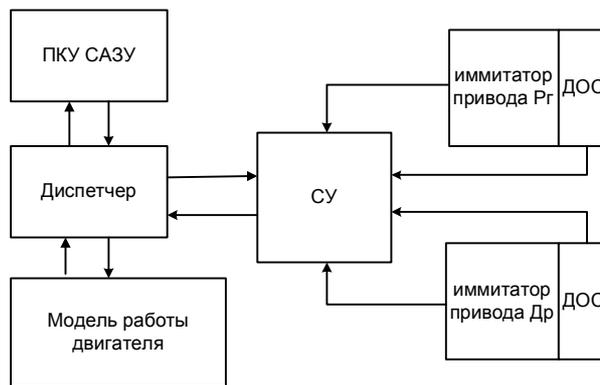


Рис. 1. Структурная схема отладки взаимодействия СУ и САЗУ

Взаимодействие между САЗУ и СУ было отлажено, однако без ввода данных со значениями углов приводов дросселя и регулятора в тестовое ПМО СИ для моделирования отклика двигателя на управление по Рк и Км невозможно обеспечение заключительных комплексных проверок функционального комплекса САЗУ.

Для повышения качества тестирования в рамках подготовки к огневым испытаниям с поддержанием САЗУ требуемых Рк и Км реализовано моделирование отклика двигателя на изменение углов приводов дросселя и регулятора в тестовом ПМО СИ испытательного стенда.

При этом проведены следующие работы:

1) проведена доработка и автономная отладка программы комплексной имитации работоспособности систем СИ, САЗУ и СУ с использованием углов приводов дросселя и регулятора, введенных в систему СИ;

2) для ввода углов приводов дросселя и регулятора в систему СИ разработана электрическая схема и подключены измерительные каналы данных от датчиков обратной связи (ДОС);

3) проведена калибровка измерительных каналов углов приводов дросселя и регулятора, введенных в систему СИ;

4) проведена отладка программы комплексной имитации работоспособности СИ, САЗУ и СУ с использованием углов приводов дросселя и регулятора, введенных в СИ и увязкой работы данных систем благодаря системе единого времени (СЕВ).

Результаты проведенных работ:

- подтверждена правильность взаимодействия составляющих ФК САЗУ испытательного стенда при автономных и комплексных испытаниях с применением тестового ПМО СИ для моделирования отклика двигателя на управление дросселем и регулятором.

- повышено качество заключительных предпусковых проверок, подтверждение соответствия настроек ФК САЗУ на режимы по Рк и Км программе ОИ.

Структурная схема взаимодействия элементов ФК САЗУ при комплексных тестовых проверках приведена на рис. 2.

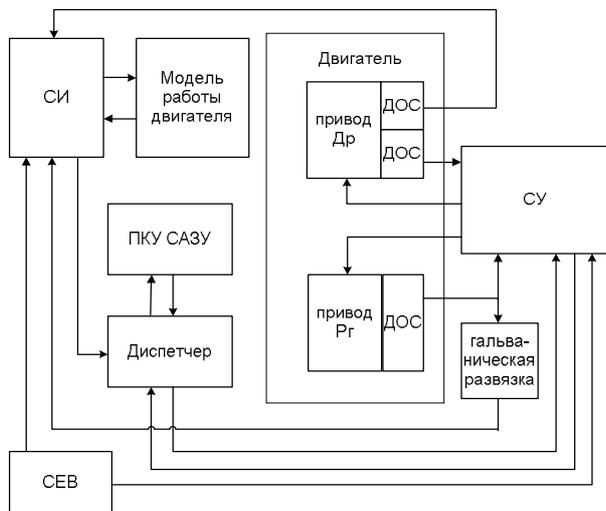


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия элементов ФК САЗУ при комплексных тестовых проверках

Окончательная логика поддержания требуемых значений R_k и K_m , реализованная в ПМО ОР САЗУ, сводится к следующим основным операциям:

САЗУ инициализирует команды управления приводами при появлении следующих признаков:

- признак необходимости уменьшения K_m (дресселирование Др):

$$R_{K_m} - P_{K_m} > 0,005 * K_{m \text{ ном}};$$

- признак необходимости увеличения K_m (форсирование Др):

$$P_{K_m} - R_{K_m} > 0,005 * K_{m \text{ ном}};$$

- признак необходимости уменьшения R_k (дресселирование Рг):

$$R_{R_k} - P_{R_k} > 0,005 * R_{k \text{ ном}};$$

- признак необходимости увеличения R_k (форсирование Рг):

$$P_{R_k} - R_{R_k} > 0,005 * R_{k \text{ ном}};$$

где P_{R_k} , P_{K_m} – значения R_k и K_m требуемые согласно программе испытания;

R_{R_k} , R_{K_m} – значения R_k и K_m , как функции G_f и G_o , рассчитываемые при ОИ в режиме реального времени;

$R_{k \text{ ном}}$ и $K_{m \text{ ном}}$ – номинальные значения R_k и K_m ;

G_f – весовой расход горючего;

G_o – весовой расход окислителя.

Значения P_{R_k} , P_{K_m} активируются ПМО ОР САЗУ при поступлении из СУ кода режима, который необходимо реализовать согласно программе ОИ.

Все требуемые согласно КД сочетания режимов R_k и K_m предварительно были отлажены на этапе общей подготовки ФК САЗУ. На рис. 3 приведены графики программных и расчетных значений R_k и K_m при одном из заключительных тестов.

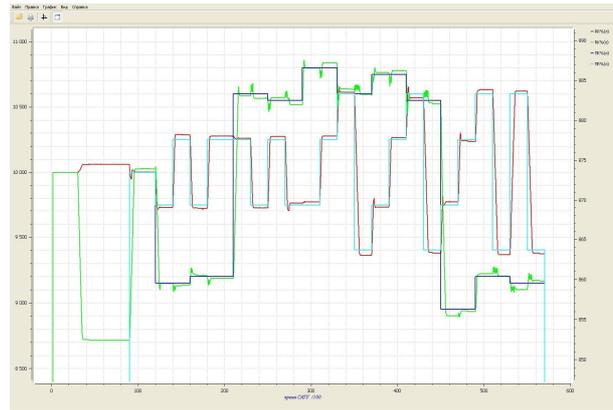


Рис. 3. Графики программных и расчетных значений R_k и K_m , полученные при отладке взаимодействия элементов ФК САЗУ

В процессе управления режимами по R_k и K_m САЗУ осуществляет контроль достоверности измерения расходов. Данная операция реализуется после завершения переходных процессов и выхода двигателя на стационарный режим. Система прекращает поддержание требуемых режимов по R_k и K_m при выработке любого из признаков недостоверности оценки весовых расходов.

Признаки недостоверности оценки весовых расходов:

- признак запрета управления по K_m и R_k при завышенной или заниженной оценке мгновенного значения весового расхода горючего более чем на 20 %:

$$\text{abs}(G_f - G_{f \text{ ном}}) > 0.2 * G_{f \text{ ном}};$$

- признак запрета управления по K_m и R_k при завышенной или заниженной оценке мгновенного значения весового расхода окислителя: более чем на 15 %:

$$\text{abs}(G_o - G_{o \text{ ном}}) > 0.15 * G_{o \text{ ном}};$$

- признак запрета управления по K_m и R_k при завышенной или заниженной оценке мгновенного значения K_m (при завышенной оценке расхода окислителя и заниженной оценке расхода горючего или при заниженной оценке расхода окислителя и завышенной оценке расхода горючего соответственно):

$$\text{abs}(G_o - K_{m \text{ ном}} * G_f) > 0.15 * G_{o \text{ ном}};$$

Для задания ограничения допустимых диапазонов значений K_m и R_k при программных и аппаратных сбоях в САЗУ и исключения работы приводов на механических упорах были определены верхние и нижние программные границы (упоры), контролируемые СУ. Верхние и нижние программные границы для значений УПД и УПР выбираются исходя из выполнения условий:

$$\text{УПД}_{\text{нижн.}} = \max(\alpha_{\text{настр}} - \alpha_{\text{DOWN}}; \text{УПД}_{\text{нижн. мех.}} + \Delta\alpha);$$

$$\text{УПД}_{\text{верх.}} = \min(\alpha_{\text{настр}} + \alpha_{\text{UP}}; \text{УПД}_{\text{верх. мех.}} - \Delta\alpha);$$

$$\text{УПР}_{\text{нижн.}} = \max(\varphi_{\text{настр}} - \varphi_{\text{DOWN}}; \text{УПР}_{\text{нижн. мех.}} + \Delta\alpha);$$

$$\text{УПР}_{\text{верх.}} = \min(\varphi_{\text{настр}} + \varphi_{\text{UP}}; \text{УПР}_{\text{верх. мех.}} - \Delta\alpha).$$

где $\Delta\alpha$ – минимальный запас для исключения работы приводов на механических упорах выбирался с учетом алгоритма, управления

приводами, реализованных в СУ. Данный алгоритм увеличивает скважность подачи импульсов при достижении границ требуемого угла, что позволяет на порядок снизить скорость вращения привода при достижении требуемого угла и фактически исключить постановку приводов на механические упоры.

$\alpha_{DOWN}, \alpha_{UP}$ - допустимые отклонения угла привода дросселя от номинального значения с учетом изменения режима по K_m , максимальной ошибки настройки двигателя по K_m , люфтов привода дросселя и самого дросселя.

$\varphi_{DOWN}, \varphi_{UP}$ - допустимые отклонения угла привода дросселя от номинального значения с учетом изменения режима по R_k , максимальной ошибки настройки двигателя по R_k , люфтов привода регулятора и самого регулятора.

Снижение скорости приводов позволяет улучшить точность вывода двигателя на требуемый режим, но увеличивает время переключений, снижает длительность участков для оценки работы двигателя на конкретном режиме и возможное число реализаций режимов в процессе одного испытания при фиксированном времени пуска двигателя. Вращение привода регулятора на скоростях близких к максимальным приводят к перерегулированию и возникновению автоколебаний в контуре ядро САЗУ – СУ – двигатель – СИ – ядро САЗУ.

При реализации задач поддержания требуемых значений R_k и K_m по командам САЗУ была выбрана оптимальная скорость переключки приводов.

Одновременно с введением ограничения на скорость переключки в алгоритмах формирования управляющих команд на привода были введены пороговые уровни нечувствительности к незначительным отклонениям R_k и K_m . Их назначением является исключение реакции на шумовую составляющую значений расходов (снижения частоты выдачи управляющих команд на привода), защита от возникновения автоколебаний в контуре управления и парирование неисправностей, вызываемых данными явлениями.

Экспериментальные данные, полученные при тестировании, показали оптимальную величину порогов, определяющих зону «ожидания» САЗУ в диапазоне 0,4 - 0,5%.

Процедура вычисления массовых расходов:

- определяется наиболее достоверное значения объемных расходов (PO , PG) и температур компонентов топлива ($TOPM$ и $TTPM$) в мерных участках:

$$PO = \text{SubMax}(PO1, PO2, PO3);$$

$$PG = \text{SubMax}(PG1, PG2, PG3);$$

$$TOPM = \text{AbsubMax}(TOPM1, TOPM2, TOPM3);$$

$$TTPM = \text{AbsubMax}(TTPM1, TTPM2, TTPM3);$$

- по текущим значениям $TOPM$ и $TTPM$ определяется плотность компонентов топлива:

$$dom = a_1 + b_1 \cdot TOPM + c_1 \cdot TOPM^2;$$

$$df = a_2 + b_2 \cdot TTPM;$$

рассчитываются массовые расходы окислителя и горючего соответственно:

$$Go = PO \cdot dom;$$

$$Gf = PG \cdot df;$$

- для снижения шумовой составляющей измерений осуществляется низкочастотная фильтрация параметров:

$$Do = Do(t-1) \cdot 7/8 + [Go - Gonom] / 8 \cdot Gonom;$$

$$Df = Df(t-1) \cdot 7/8 + [Gf - Gfnom] / 8 \cdot Gfnom.$$

Для сокращения объема вычислений при расчете R_k в режиме реального времени в ПКУ САЗУ для определения R_k применен интерполяционный полином.

Выполнение САЗУ при огневых испытаниях двигателей 14Д23 и РД0124А задачи по реализации многоуровневых режимов по R_k и K_m при точности поддержания R_k с погрешностью в 1,5% от номинального значения R_k и точности поддержания K_m с погрешностью в 1% от номинального значения K_m обеспечило выполнение методики контроля качества изготовления двигателей.

Результаты исследования

График программных и расчетных значений R_k и K_m , полученных при проведении ОИ двигателя 14Д23 приведены на рис. 4.

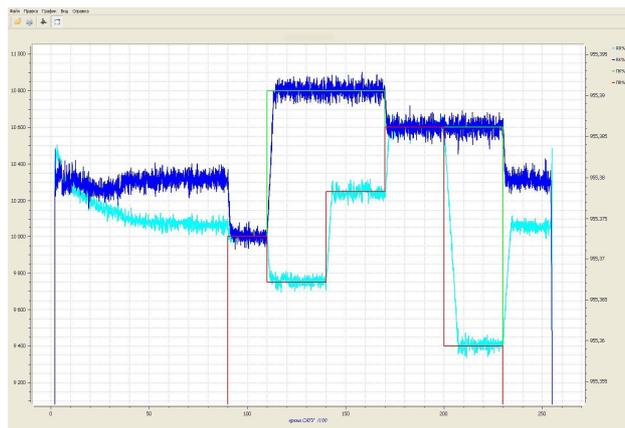


Рис. 4. График программных и расчетных значений R_k и K_m , полученных при проведении ОИ двигателя 14Д23

Задача поддержания многоуровневых режимов по R_k и K_m реализована путем добавления в ПКУ 43 алгоритмов: 15 алгоритмов подготовки данных, 10 диагностических алгоритмов и 18 алгоритмов принятия решения.

Номенклатура алгоритмов, задействованных при реализации задачи поддержания многоуровневых режимов по R_k и K_m приведена на рис. 5.

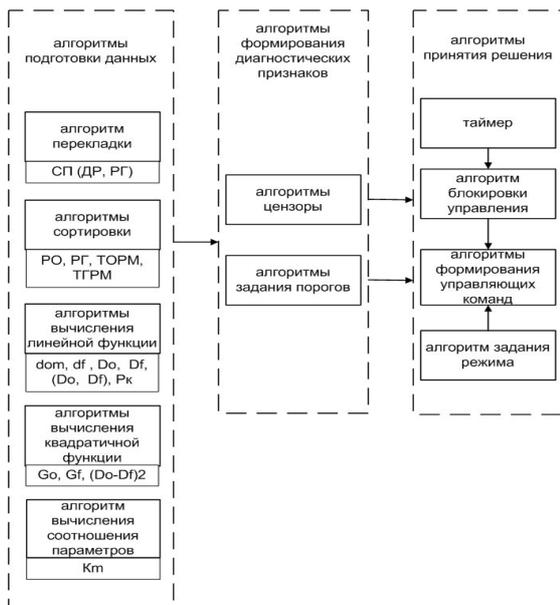


Рис. 5. Алгоритмы реализующие функции поддержания режимов по Рк и Км

Работы по реализации САЗУ функции поддержания Рк и Км двигателей 14Д23 и РД0124А

Воронежский государственный технический университет

THE APPLICATION OF THE SYSTEM OF EMERGENCY PROTECTION AND CONTROL FOR ENSURE QUALITY CONTROL OF ENGINES 14D23 AND RD0124

S.M. Pasmurnov, Candidate of Engineering Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Russian Federation, e-mail: smpasmurnov@mail.ru

D.Yu. Yakush, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Leading Designer, AO KBKhA, Voronezh, Russian Federation, e-mail: duyakush@mail.ru

The task of support of maintenance of values of pressure in the working camera when carrying out fire tests and ratios of components of fuel is to the important task by deliveries of engines to operation. And article implementation process of a pressure maintenance in the combustion chamber and ratios of components of fuel of engines 14D23 and RD0124A with enhanced accuracy by means of system of abnormal protection and control is described. It is for this purpose offered to realize finishing of system of abnormal protection and control of Operation it is offered to carry taking into account implementation of the primary task – support of protection of the engine and bench in case of fire tests. Finishing of system of abnormal protection and control was carried out with the requirement of minimization of risk of failure of the given cyclogram and formation of spurious command. In case of implementation of the mode with back coupling, especially in case of requirements of numerous change of the modes, careful debugging of interaction of a kernel of system of protection and management system is necessary. Such debugging is possible only when checking with use of the test model of the engine considering influence on parameters of the engine of angles of the drive of the regulator and the choke. The skeleton diagram of debugging of interaction of management system and the program of monitoring and control of system of abnormal protection is provided in article. For improvement of quality of testing within preparation for fire tests with maintenance the system of abnormal protection and control of indices realized simulation of a response of the engine to change of angles of drives of the choke and the regulator. The main results of this operation are marked

Key words: system of emergency protection and control, software, algorithm, liquid rocket engines

References

1. Galeev A. G. Osnovy ustrojstva ispytatel'nyh stendov dlja otrabotki zhidkostnyh raketnyh dvigatelej i dvigatel'nyh ustanovok [Bases for design of test benches for testing of liquid rocket engines and propulsion systems]. – g. Peresvet, Moskovskoj oblasti: Izd-vo FKP “NIC RKP”, 2010. - 178 s.: il.
2. Kurpatenkov V.D., Kesaev H.V. Raschet kamery zhidkostnogo raketnogo dvigatelja [Calculation of liquid-propellant engine chamber]. – M.: Izdatel'stvo MAI, 1993, – 112s.
3. Bondar' A.I. Realizacija PMO FK SAZU zadach podderzhanija trebuemyh znachenij Rk i Km [Implementation of PMO FC SAZU task of maintaining the required values of RK and Km]/ A.I Bondar', K.V. Goven'ko, D.Ju. Jakush // Nauchno-tehnicheskij jubilejnyj sbornik. KB Himavtomatiki: V 3 tomah / Pod red. V.S. Rachuka. – Voronezh: «Kvarta», 2012. T.3. C. 175-181.

на практике подтвердили возможность наращивания функциональности ВНА с минимизацией вероятности внесения непреднамеренных изменений в ранее задействованный программный код.

Введение в САЗУ функции поддержания Рк и Км позволило повысить качество испытаний, подтверждающих технические требования к двигателям.

Литература

1. Галеев А. Г. Основы устройства испытательных стенов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок [Текст] / А.Г. Галеев. – Пересвет, Московской области: Изд-во ФКП “НИЦ РКП”, 2010. - 178 с.: ил.
2. Курпатенков В.Д. Расчет камеры жидкостного ракетного двигателя [Текст] / В.Д. Курпатенков, Х.В. Кесаев. – М.: Издательство МАИ, 1993, – 112с.: ил.
3. Бондарь А.И. Реализация ПМО ФК САЗУ задач поддержания требуемых значений Рк и Км [Текст] / А.И. Бондарь, К.В. Говенько, Д.Ю. Якуш // Научно-технический юбилейный сборник. КБ Химавтоматики: В 3 томах / Под ред. В.С.Рачука. – Воронеж: «Кварт», 2012. Т.3. С. 175-181.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГИБКИМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

А.Д. Данилов, В.А. Ломакин

В статье рассматриваются проблемы комплексной автоматизации машиностроительного производства, а также создания интегрированной системы управления гибкими автоматизированными производствами. На основе проведенного анализа, чтобы преодолеть функциональный и информационный разрыв между системами технологической подготовки и оперативного управления производством и системами управления гибкими автоматизированными производствами, для повышения гибкости и производительности предприятия предлагается осуществление взаимоинтеграции данных обособленных и независимых друг от друга систем с помощью единого информационного пространства. Ядром созданной структуры будет PDM-система, которая является основой для производственного планирования и управления; она обеспечивает функционирование единой информационной среды на базе электронного архива, организует обмен информацией между подразделениями по проектированию и управлению производствами, с одной стороны, и производственными подразделениями – с другой стороны. Однако главной особенностью производства является то, что в процессе работы существует вероятность отказа технологической единицы или же её потребуется остановить на профилактический ремонт, вследствие этого необходимо иметь возможность динамического перераспределения нагрузки между оставшимся оборудованием, чтобы не останавливать все производство. Для улучшения оперативного управления производственными планами предлагается использовать инструментальные особенности муравьиных алгоритмов

Ключевые слова: гибкие автоматизированные производства, интегрированные системы управления, единое информационное пространство, муравьиный алгоритм

1. Введение

Комплексная автоматизация механической обработки обеспечивает значительное повышение производительности труда и снижение себестоимости продукции при одновременном повышении ее качества, высвобождение большого числа рабочих, улучшение условий труда.

До недавнего времени проблема комплексной автоматизации в массовом производстве достаточно полно решалась путем создания автоматических линий с широким применением многошпиндельной и многоинструментной обработки на высокопроизводительных автоматах и полуавтоматах. Однако массовое производство составляет всего около 20 % общего объема машиностроения. Остальные 80 % приходятся на серийное и единичное производство, где требуется частая переналадка оборудования и поэтому обычные автоматические линии неприемлемы. Такое производство называется быстросменным и требует особых методов и средств автоматизации. Вместе с тем в условиях ускоренного технического прогресса, когда модели выпускаемых машин все чаще заменяют новыми, более совершенными, массовое производство меняет свой характер, превращаясь в массовое - быстросменное. Для производств такого характера должны создаваться быстропереналаживаемые автоматизированные комплексы, или так называемые гибкие комплексно-автоматизированные производства (ГАП), состоящие из оборудования с ЧПУ с управлением от центральной ЭВМ [1].

Данилов Александр Дмитриевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: danilov-ad@yandex.ru
Ломакин Владислав Андреевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: vldlmlkn@rambler.ru

2. Структура ГАП

Организационная структура производства подразделяется на следующие уровни (рис. 1):

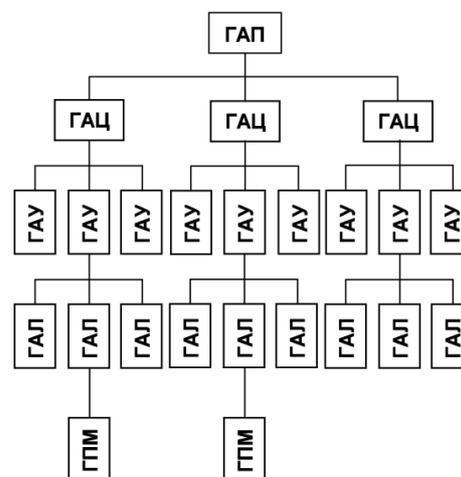


Рис. 1. Организационная структура ГАП

- гибкий производственный модуль (ГПМ) - единица технологического оборудования с устройством программного управления и средствами автоматизации технологического процесса, которая функционирует автономно, осуществляет многократные циклы и характеризуется способностью встраивания в систему более высокого уровня;

- гибкий автоматизированный участок (ГАУ), гибкая автоматизированная линия (ГАЛ) - совокупность ГПМ, объединенных автоматизированной системой управления и функционирующих по технологическому маршруту, в котором предусмотрена или не предусмотрена возможность

изменения последовательности использования технологического оборудования;

- гибкий автоматизированный цех (ГАЦ) - совокупность ГАУ и (или) ГАЛ, предназначенная для изготовления изделий заданной номенклатуры. Схема является общей, в реальной системе количество структурных элементов может быть другим.

3. Проблемы взаимоинтеграции систем

В современных условиях быстропеременная становится общей характерной чертой всего машиностроения. Таким образом, основной проблемой в организации мощного и гибкого производства является сложность внедрения средств автоматизации для обеспечения оперативного воздействия на работу оборудования с целью быстрой переналадки для выпуска новой продукции.

Наиболее остро обсуждается вопрос экономичности и эффективности интеграции САМ-элементов в структуру управления гибкими автоматизированными производствами. САМ-система осуществляет автоматизированную подготовку управляющих программ для оборудования с ЧПУ. Данная система снижает вероятность человеческих ошибок, и, благодаря этому, количество конструкторских исправлений и переделок, неправильно спроектированных компонентов уменьшается, по сравнению с предыдущими проектами, более чем на 50 %. Таким образом, внедряя элементы автоматизированной подготовки производства в структуру управления гибкими автоматизированными производствами предприятие переходит на существенно новый уровень гибкости и технологичности производства, а так же получает положительный экономический эффект за счет ускорения производства продукции.

Сложность интеграции заключается в том, что три типичных уровня автоматизации

промышленных предприятий АСУ, САПР и АСУТП чаще всего на производстве развиваются обособленно и независимо друг от друга[1].

Все они проектировались и создавались, исходя из требований разных подразделений предприятия, и автономно обслуживали разные процессы, происходящие на производстве. Несмотря на то, что эффективное функционирование всякого предприятия требует взаимоувязанной работы всех его частей, изначально перед ними не ставились единые цели, они были слабо связанными физически и информационно, а чаще не связанными вовсе.

Кроме этого, каждая система традиционно создавалась по своим корпоративным правилам и законам. Поэтому они практически не могли обмениваться информацией между собой, так как системы не были унифицированными. К тому же, каждая из систем часто строилась на основе различных аппаратных, программных и информационных стандартов, что существенно осложняло сложившуюся ситуацию. На данный момент существует функциональный и информационный разрыв между системами (рис. 2).

Таким образом, если на предприятии не осуществлена взаимоинтеграция САПР в автоматизированную систему управления ГАЦ, либо выполнена частично, то увеличиваются затраты на производство продукции: конструкторские бюро и технологические отделы тратят много времени на создание конструкторской документации и исправление ошибок в ней, при запуске изделия в производство, может быть испорчено большое количество заготовок, прежде чем управляющая программа для станка с ЧПУ будет отлажена, также возможен дисбаланс со стороны планирования ресурсов предприятия, - всё это косвенные экономические потери [5].

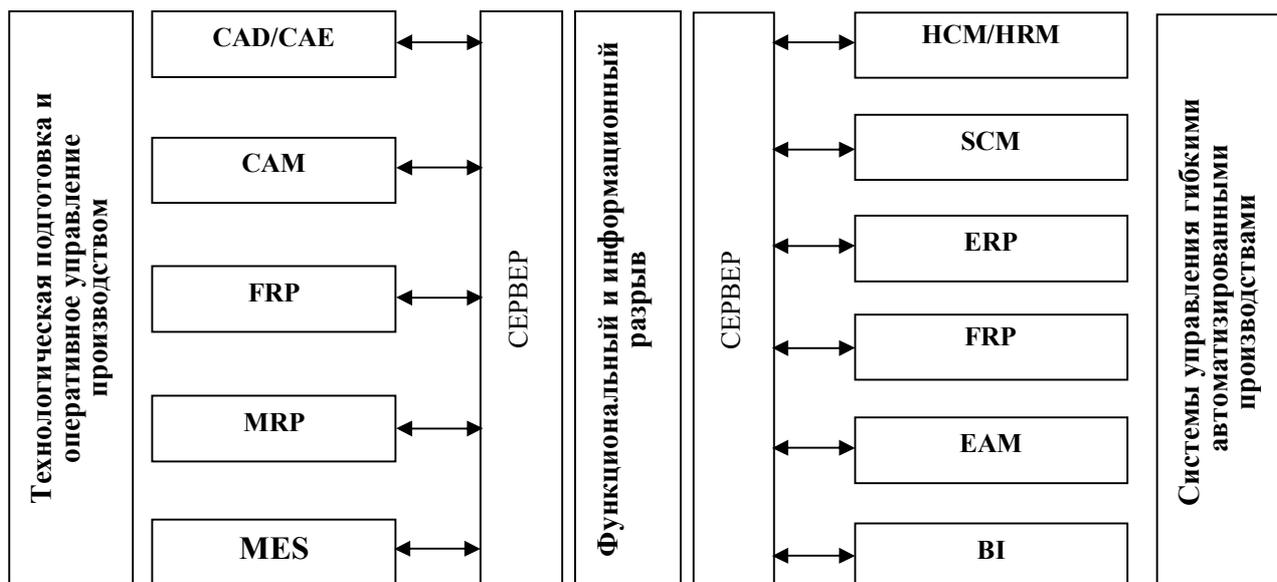


Рис. 2. Функциональный и информационный разрыв

4. Взаимоинтеграция на основе ЕИП

Таким образом, для повышения гибкости и производительности предприятия, для ликвидации функционального разрыва между системами технологической подготовки и системами управления гибкими автоматизированными производствами предлагается создание единого информационного пространства.

Основой ЕИП будет система управления данными об изделии. PDM (Product Data Management) – является основой для производственного планирования и управления; обеспечивает функционирование единой информационной среды на базе электронного архива, организывает обмен информацией между подразделениями по проектированию и управлению производствами, с одной стороны, и производственными подразделениями – с другой стороны. Ядром PDM является нормативно-справочная база, отражающая структуру и специфику работы конкретного предприятия. Для управления производством требуются номенклатурные базы данных, поэтому автоматизируются все справочники и нормативные данные, упорядочиваются исходные данные, вводится система кодирования для комплектующих и покупных изделий, наполняется база данных PDM[2].

В конечном итоге, формируется электронный архив конструкторской и технологической документации. При использовании единого информационного пространства появляется возможность интеграции САМ-элементов в структуру управления гибкими автоматизированными производствами[6]. Ниже изображена схема интеграции САМ-элементов в структуру систем управления ГАП (рис.3).

5. Оптимизация производственных планов ГАП

Взаимоинтеграция систем, бесспорно,

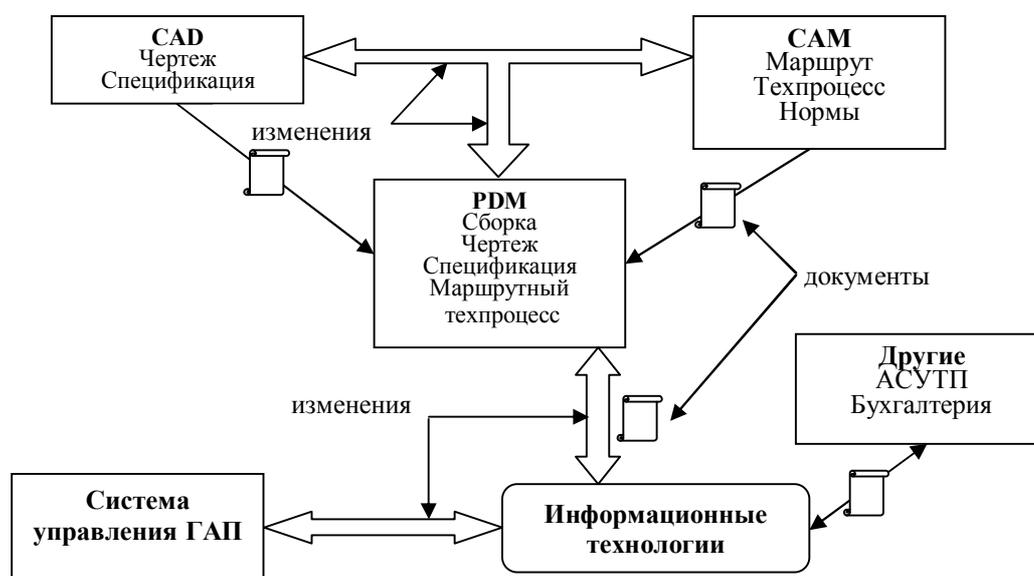


Рис. 3. Схема интеграции САМ-элементов в структуру систем управления ГАП

повышает технологический уровень предприятия, экономической эффективности, а так же качества продукции.

Однако главной особенностью производства является то, что в процессе работы существует вероятность отказа технологической единицы или же её потребуется остановить на профилактический ремонт, вследствие этого необходимо иметь возможность динамического перераспределения нагрузки между оставшимся оборудованием, чтобы не останавливать все производство.

Практика показывает, что задачи подобного рода эффективно решаются эволюционными методами, например, с помощью муравьиного алгоритма.

Для того чтобы справиться с неравномерной загрузкой производственных модулей, для оптимального подбора технологического оборудования, для перераспределения нагрузки на производственные единицы в случае непредвиденного выхода оборудования из строя, предлагается внедрить в систему управления ГАП имитационный алгоритм моделирования производственного процесса [7].

Применение инструментальных возможностей муравьиных алгоритмов для оперативного управления производственными планами ГАП предполагает распределение оборудования по технологическим операциям согласно плану выпуска продукции, а также позволяет проводить ремонт ГПМ и профилактические работы, без простоев производства. Также, благодаря применению муравьиных алгоритмов достигается оптимизация складской логистики.

Задачей создания оптимального плана работы ГАП является составление расписания технологических маршрутов обработки деталей для

производственных участков, удовлетворяющего сформулированным условиям, которое представляется в виде графа.

Для решения задач оптимизации производственных маршрутов, удовлетворяющих соответствующим критериям, существует огромное количество графов.

Задача представляется в виде графа:

$$G=(V,D,P), \quad (1)$$

где V - вершины, которые описывают этапы обработки деталей;

D - дуги графа, описывают время перехода между технологическими операциями;

P - матрица правил перехода, для каждой дуги (i,j) ∈ D присваивается вес P_{ij}.

Изначально формируется граф, который состоит из стартовой и конечной вершины, а также из промежуточных вершин, которым присваиваются этапы технологических операций (ТО) над определенными изделиями. В стартовой вершине задаются начальные параметры алгоритма, которые соответствуют плану производственной программы. На следующем этапе создается матрица указателей на ряды вершин, при этом количество рядов равно числу наименований изготавливаемых изделий.

Количество технологических операций над деталями определяет число вершин в каждом ряду. Данные параметры задаются в соответствии с технологической картой и хранятся в массивах.

Следующим этапом формирования графа является инициализация ребер, результат записывается в виде динамического списка.

Далее создается массив муравьев, элементами данного массива является количество технологических машин, а так же транспорт, который участвует в производстве. К параметрам муравьев относятся объемы лотков, в которые помещаются заготовки, готовые изделия и инструмент.

Множество муравьев k=1,...,n_k помещается в стартовую вершину. Затем каждый муравей осуществляет переход в вершину I уровня на основании алгоритма моделирования полной группы событий (2).

$$P_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sum K_{ij}}, \sum P_{ij} = 1, \quad (2)$$

где K_{ij} – рассчитывается по формуле (3)

$$K_{ij} = \frac{To_{ij} * kf}{Ts_i}, \quad (3)$$

где To_{ij} – время, затраченное на технологическую операцию O_{ij} над партией деталей i-го типа (4);

kf – коэффициент, характеризующий возможность перехода (kf = 1);

Ts_i - срок изготовления партии деталей i-го типа (5).

$$To_{ij} = \sum_{j=1}^m Tn_{ij} + Tv_{ij} * n_{ij}, \quad (4)$$

где Tv_{ij} – время, затраченное на технологи-

ческую операцию O_{ij} над деталью i-го типа;

n_{ij} - количество деталей, ожидающих обработку di (партия запуска);

Tn_{ij} – время, затраченное на наладку ГПМ для выполнения технологической операции O_{ij}.

$$Ts_i = k_i * dl \quad (5)$$

где k_i – количество дней на выполнение заказа;

dl - длительность рабочего дня, ч.;

При переходе между вершинами пересчитываются следующие параметры:

- в вершине, в которую перешёл муравьиный агент, количество запланированных деталей уменьшится, а число выпущенных деталей увеличится на величину предметов, содержащихся в лотке для заготовок;

- для муравьиного агента определяется время, за которое он освободится по формуле: (6).

$$Tos_{ij} = Tn_{ij} + Tnp_{ij} + n_{ij} * Tv_{ij}, \quad (6)$$

Затем определяются вероятности перехода из начала графа в вершины I уровня, учитывая тот факт, что некоторое количество заготовок ушло на обработку. По формуле (7) определяется время выполнения технологической операции:

$$Tv_{ij} = \sum_{j=1}^m Tn_{ij} + Tv_{ij} * (n_{i_{пл}} - n_{ij}) \quad (7)$$

где n_{ij} - количество обрабатываемых деталей на данный момент времени d_i (партия деталей).

В итоге, осуществляется переход всех агентов в вершину I уровня.

Затем, определив муравья, у которого время выполнения технологической операции минимально, рассчитываются вероятности перехода в доступные вершины.

При расчетах вероятностей необходимо учитывать, что в качестве n_{пл} необходимо брать параметр вершины, в которую нужно осуществить переход. Для определения времени, которое затрачивается на выполнение плана изготовления i-й детали, применяют формулу (8).

$$Ts_i = Ts_i - Tos_{ij} \quad (8)$$

Когда завершается последняя операция над i-тым типом выпускаемых изделий, что соответствует нахождению муравья в конечной вершине, количество фактически изготовленных деталей увеличивается на количество готовых. Данный маршрут проходят все муравьи, когда будет произведен расчет вероятностей возможных переходов между вершинами. Элементы массива оборудования в вершине, из которой осуществляется переход, обнуляются, а в вершине перехода становятся равными 1.

В итоге, алгоритм создания маршрута по графоаналитической модели распределения загрузки технологических модулей одной популяцией муравьев продолжается, пока количество выпущенных и запланированных деталей не сравняется. Таким образом, время выполнения плана по изготовлению продукции равно времени освобождения последнего муравья, выполняющего обработку i-го типа детали [7].

6. Заключение

Таким образом, благодаря интеграции и усовершенствованию системы управления гибкие автоматизированные производства будут в себе сочетать гибкие технологии, позволяющие быстро и с минимальными затратами перестроить производство при выходе из строя технологического оборудования или оперативно наладить выпуск нового вида продукции.

Также высокий уровень автоматизации взаимосвязанных технологических операций и процесса управления ими, позволяет исключить необходимость непосредственного участия людей в производственном процессе.

Литература

1. Маслобоев, А.В. Интегрированные системы управления [Текст] / А.В. Маслобоев, – Апатиты: КФ ПетрГУ, 2009. – 157 с.

2. Данилов, А.Д. Цифровые системы управления [Текст] / А.Д. Данилов, В.Н. Головнев,- Воронеж: ВГЛТА, 2007.- 235 с.

3. Данилов, А.Д. GTD, коллаборация и автоматизация документооборота на крупных предприятиях с распределенной структурой [Текст] /А.Д.Данилов, А.Н. Боровцов //Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2011.- Т. 7.- № 1.- С. 69-73.

4. Данилов, А.Д. Модели для автоматизированного проектирования поточных производств [Текст] /А.Д. Данилов // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2009.- Т.5.- № 6.- С. 163-166.

5. Данилов, А.Д. Технические средства автоматизации [Текст] / А.Д. Данилов. - Воронеж: ВГЛТА, 2007.- 340 с.

6. Погонин, В.А. Интегрированные системы проектирования и управления. Корпоративные информационные системы [Текст] / В.А.Погонин, А.Г. Схиртладзе, - Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2006. - 144 с.

7. Ченгарь, О.В. Оптимизация работы производственного участка машиностроительного предприятия на основе метода муравьиных колоний [Текст] / Ю.А. Скобцов, О.В. Ченгарь // Вестник Национального технического университета. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. №31. – С. 177-183.

Воронежский государственный технический университет

INTEGRATION CAM-ELEMENTS IN STRUCTURE OF CONTROL BY THE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM

A.D. Danilov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

V.A. Lomakin, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vldlmkn@rambler.ru

In article it are consider problems of complex automation of machine-building production and problems of creation of the integrate control system by the flexible manufacturing systems. To overcome the functional and information gap between CAD/CAE/CAM and control systems for flexible automated production, to improve the flexibility and performance of the company is proposed that the integration of isolated systems through a single information space. The PDM system is provides production planning and management, functioning of the single information environment based on electronic archive, organizes exchange of information between divisions on designing and management of productions and production divisions. On production there is a probability of refusal of technological unit or a stop on preventive repair. Dynamic redistribution of loading between the equipment is necessary not to stop production. It is proposed to use instrumental characteristics of ant algorithm to optimize the operational control of production plans

Key words: flexible manufacturing system, integrate control systems, uniform information field, ant algorithm

References

1. Masloboev A. V. Integrirovannye sistemy upravleniya [Integrated control systems] / - Apatity: KF PSU, 2009. – 157 p.
2. Danilov A. D. Cifrovye sistemy upravleniya [Digital control systems] / Voronezh. - Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007. – 235 p.
3. Danilov A. D. GTD, kollaboracija i avtomatizacija dokumentooborota na krupnyh predpriyatijah s raspredelennoj strukturoj [GTD, collaboration and document circulation automation on the large enterprises with the distributed] / Messenger Voronezh State Technical University. – 2011. – Т. 7. - №1.-69-73 p.
4. Danilov A. D. Modeli dlja avtomatizirovannogo proektirovanija potocnyh proizvodstv [Models for the automated designing of line productions] / Messenger Voronezh State Technical University. – 2009. – Т. 5. - №6.-163-166 p.
5. Danilov A. D. Tehniceskie sredstva avtomatizacii [Technical means of automation] / Voronezh. - Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007. – 340 p.
6. Pogonin V. A. Integrirovannye sistemy proektirovanija i upravlenija. Korporativnye informacionnye sistemy [The integrated systems of design and management. Corporate information systems] / Tambov State Technical University. – 2006, - 144 p.
7. Chengar O. V. Optimizacija raboty proizvodstvennogo uchastka mashinostroitelnogo predpriyatija na osnove metoda murav'inyh kolonij [Imitating algorithm of modeling of organizational technological processes in a flexible production systems] / Messenger of National technical university. – 2010. № 31. – 177-183 p.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

С.А. Винокуров

В работе предлагаются математические зависимости и проводится исследование рабочего тока в адаптивной электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока. Приводятся результаты исследования влияния угла между полем ротора и статора бесконтактного двигателя постоянного тока на рабочий ток двигателя. По математической модели получены характеристики рабочего тока бесконтактного двигателя постоянного тока без учета влияния угла между полем ротора и статора и при значении угла, равном 10° . Сделаны выводы об улучшении динамических характеристик и энергетики электромеханической системы с бесконтактным двигателем постоянного тока при учете значения угла между полем ротора с статора двигателя в математической модели. Исследуются соответствующие математические зависимости и полученные характеристики. Приводится обобщенная структурная схема формирования управления при наличии идеального регулятора, рассматриваются передаточные функции системы при расположении регулятора в прямой цепи и цепи обратной связи. Рассматривается методология синтеза адаптивного непрямого управления в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока, приводятся соответствующие передаточные функции для исследования процессов в системе. Практическое использование результатов статьи позволит реализовать режим энергосбережения в электромеханической системе с бесконтактным двигателем постоянного тока при улучшении ее динамических характеристик

Ключевые слова: электромеханическая система, бесконтактный двигатель постоянного тока, адаптивное управление

В настоящее время исследования, направленные на расширение области практического использования адаптивных электромеханических систем (ЭМС) с исполнительными элементами на базе бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ) приобретают все большую актуальность. Данное обстоятельство обусловлено очевидными по сравнению с исполнительными двигателями других типов и достаточно подробно описанными в литературе преимуществами БДПТ, к числу которых относят их хорошие регулировочные способности, относительно высокие КПД и надежностные показатели [1, 2, 3]. Отмеченные показатели обуславливают перспективность более широкого распространения ЭМС с БДПТ в современном высокотехнологичном медицинском и промышленном оборудовании, специальных устройствах военного назначения, в аппаратуре специального и аэрокосмического приборостроения.

При синтезе адаптивных систем необходимо учитывать, что разработку методов, моделей и алгоритмов управления ЭМС с БДПТ для различных технологических процессов выполняют с учетом необходимости обеспечения исполнительным элементом в процессе его функционирования требуемых динамических свойств и характеристик.

При обеспечении в ЭМС с БДПТ быстродействия как функционального свойства и соответствующих количественных показателей

переходных процессов в процессе синтеза оборудования необходимо минимизировать потребляемую мощность в рамках накладываемых ограничений. Точность отработки управляющих функций, влияющая, в свою очередь, на выходную величину системы и качество технологического процесса, должна быть обеспечена либо за счет внутренних свойств системы без использования дополнительных схмотехнических устройств, либо при минимальном усложнении управляющего устройства.

В БДПТ на динамические характеристики оказывают влияние различные параметры двигателя, например угол коммутации α_k и угол между полем ротора и статора Θ . Изменение этих параметров позволяет повысить эффективность БДПТ и улучшить его эксплуатационные характеристики в целом. В настоящее время исследованию влияния угла Θ на рабочий ток БДПТ $i(t)$ уделяется мало внимания, поэтому при проектировании двигателя значение этого угла не учитывается ($\Theta = 0^\circ$). Однако вопрос оценки влияния Θ на $i(t)$ представляет достаточный интерес для проведения соответствующего исследования.

При проведении исследований применялась математическая модель БДПТ, разработанная в среде MATLAB Simulink.

В основу модели положены уравнения, описывающие рабочие процессы в ЭМС с БДПТ, рассматриваемой как m подсистем с позиционными обратными связями [4]. Все m подсистем работают циклически, в строго определенном порядке

Винокуров Станислав Анатольевич – ВГТУ,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: stvinokurov@rambler.ru

подключения. Данный прием предлагается для повышения точности рассмотрения и, следовательно, математического описания рабочих процессов, происходящих в ЭМС с БДПТ.

Для двигательного режима уравнение электрического равновесия (баланса напряжений) имеет следующий вид:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = U(t)c \cos(\varphi - \frac{\alpha_k}{2} + \Theta).$$

Для исследования рабочего тока БДПТ будем использовать следующую зависимость:

$$i(t) = \frac{M_H}{c \cos(\omega t - \frac{\alpha_k}{2} + \Theta)}.$$

Далее были графически проанализированы зависимости $i(t)$ при различных изменениях угла между полем ротора и статора Θ , которые приведены на рис. 1 и 2.

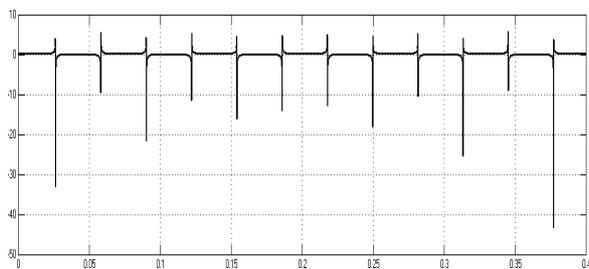


Рис. 1. Рабочий ток БДПТ при $\Theta = 0^\circ$

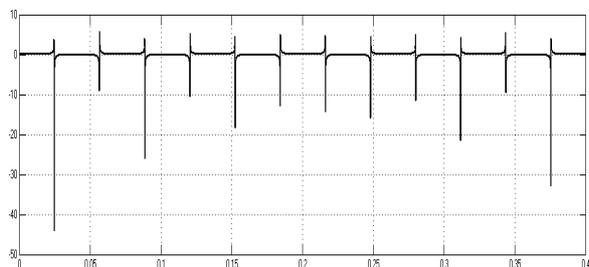


Рис. 2. Рабочий ток БДПТ при $\Theta = 10^\circ$

Из исследованных графиков можно сделать вывод, что при изменении угла Θ от -10° до 10° наблюдается область без сильных скачков тока при коммутациях. Если при этом варьировать угол коммутации и изменять мощность на валу двигателя, что в свою очередь позволяет воздействовать на энергетику двигателя, то можно повысить его КПД [5, 6, 7]. Дальнейшие изменения угла Θ как в положительной, так и в отрицательной области, увеличивает скачок тока и общее энергопотребление, что негативно сказывается на режимах эксплуатации БДПТ [8].

Использование бесконтактных двигателей постоянного тока в качестве исполнительных элементов электромеханических систем различного назначения позволяет обеспечить повышение

уровня надежности соответствующего оборудования. Оценка уровня функциональной надежности ЭМС с БДПТ с использованием соответствующих методов [9, 10] свидетельствует об улучшении соответствующих параметров [11].

ЭМС, автоматически определяющую нужный закон регулирования посредством анализа поведения исполнительного элемента при текущем управлении и под воздействием внешних возмущающих воздействий от внешней среды, можно считать адаптивной. Системы, в которых структура регулятора задана изначально, а в процессе регулирования требуется определить алгоритм настройки его коэффициентов, будем считать адаптивными самонастраивающимися.

В соответствии с фундаментальными принципами построения адаптивных систем можно констатировать, что в данном оборудовании в явном или неявном виде должна использоваться модель с желаемыми динамическими характеристиками [12, 13, 14]. В случае, когда при настройке коэффициентов регулятора рассогласование между реальным объектом управления и используемой моделью сводится к нулю, формируется прямое адаптивное управление (direct adaptive control). При этом используется информация о действующем законе управления и о выходной координате системы. В прикладных задачах, когда необходимо идентифицировать объект, а затем определять коэффициенты настройки регулятора, управление можно классифицировать как непрямо адаптивное (indirect adaptive control). Используемые в современных ЭМС регуляторы, функционирующие подобным образом, можно считать самонастраивающимися и использовать в задачах их синтеза соответствующие методологические подходы, например, изложенные в работах [12, 13].

Рассмотрим методологию синтеза адаптивного непрямого управления в ЭМС с БДПТ.

Следует заметить, что в задачах синтеза современного промышленного оборудования, в том числе, ЭМС с БДПТ, создание идеального регулятора без измерения производных выходной координаты, является актуальным. Если при этом информация о рабочих параметрах ЭМС с БДПТ является полной, доступной для измерений или априорно известной, обеспечивающей достижение целей управления

$$e(t) \rightarrow 0, \text{ при } t \rightarrow \infty,$$

$$e(t) = y(t) - y_3(t),$$

где $y(t)$, $y_3(t)$ – выходные координаты реального объекта и эталонной модели, то соответствующая задача синтеза регулятора значительно упрощается.

Передаточную функцию БДПТ обобщенно рассмотрим в следующем виде

$$W_{\text{БДПТ}}(p) = k \frac{(a_0 p + 1)}{(d_0 p^2 + d_1 p + 1)},$$

или после упрощения

$$W_{БДПТ}(p) = k \frac{a(p)}{d(p)},$$

где k, a_0, d_0, d_1 – множество неизвестных рабочих параметров БДПТ [15].

Желаемое поведение исполнительного элемента (БДПТ) в ЭМС зададим некоторой эталонной моделью с передаточной функцией вида

$$W_{\mathcal{E}}(p) = k_{\mathcal{E}} \frac{(a_{0\mathcal{E}}p + 1)}{(d_{0\mathcal{E}}p^2 + d_{1\mathcal{E}}p + 1)},$$

или

$$W_{\mathcal{E}}(p) = k_{\mathcal{E}} \frac{a_{\mathcal{E}}(p)}{d_{\mathcal{E}}(p)}.$$

Будем далее учитывать, что для реальной системы все коэффициенты эталонной модели выбираются из условия желаемого расположения нулей и полюсов передаточной функции на комплексной плоскости, определяемого обеспечением желаемых динамических свойств системы.

При использовании эталонной модели будем также полагать, что

$$y(p) = W_{\mathcal{E}}(p) \cdot g(p),$$

где $y(p), g(p)$ – изображения выходной и входной координат соответственно.

С учетом изложенного выше определим передаточные функции регуляторов в прямой цепи и в цепи обратной связи.

Структурная схема, соответствующая рассматриваемому случаю и предусматривающая наличие регулятора в прямой цепи и в цепи обратной связи, приведена на рис. 3.

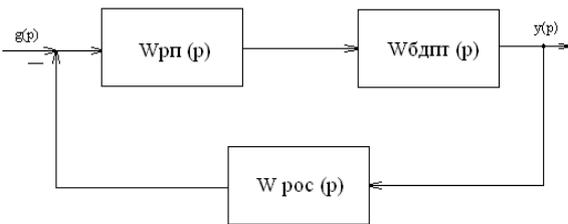


Рис. 3. Структурная схема формирования управления в ЭМС с БДПТ при наличии идеального регулятора

По сформулированному условию передаточная функция замкнутой системы должна соответствовать эталонной передаточной функции, т.е.

$$W_{\mathcal{E}}(p) = k_{\mathcal{E}} \frac{a_{\mathcal{E}}(p)}{d_{\mathcal{E}}(p)}.$$

Получим выражение для передаточной функции рассматриваемой системы в виде

$$\Phi(p) = \frac{y(p)}{g(p)}.$$

При этом запишем:

$$\Phi(p) = \frac{W_{рп}(p) \cdot W_{БДПТ}(p)}{1 + W_{рп}(p) \cdot W_{БДПТ}(p) \cdot W_{РОС}(p)}.$$

Приравняв выражения для передаточной функции эталонной модели процесса и передаточной функции замкнутой системы $W_{\mathcal{E}}(p) = \Phi(p)$, получим передаточные функции для регуляторов в прямой цепи и в цепи обратной связи:

$$W_{рп}(p) = \frac{k_{\mathcal{E}} a_{\mathcal{E}}(p)}{k \cdot a(p)},$$

$$W_{РОС}(p) = \frac{d_{\mathcal{E}}(p) - d(p)}{k_{\mathcal{E}} \cdot a_{\mathcal{E}}(p)}.$$

После подстановки в выражение для передаточной функции замкнутой системы, окончательно получим

$$\Phi(p) = \frac{k_{\mathcal{E}} a_{\mathcal{E}}(p)}{d_{\mathcal{E}}(p)}.$$

Необходимо заметить, что регулятор в прямой цепи для рассматриваемой системы технически реализовать достаточно просто. Если априорно известны параметры передаточной функции БДПТ, тогда передаточная функция регулятора в прямой цепи определится следующим выражением:

$$W_{рп}(p) = \frac{k_{\mathcal{E}}(a_{0\mathcal{E}}p + 1)}{k(a_0p + 1)}.$$

Более сложной задачей будет техническая реализация регулятора для цепи обратной связи, передаточная функция которого может быть выражена следующей зависимостью:

$$W_{РОС}(p) = \frac{(d_{0\mathcal{E}}p^2 + d_{1\mathcal{E}}p + 1) - (d_0p^2 + d_1p + 1)}{k_{\mathcal{E}}(a_{0\mathcal{E}}p + 1)},$$

или

$$W_{РОС}(p) = \frac{(d_{0\mathcal{E}} - d_0)p^2 + (d_{1\mathcal{E}} - d_1)p}{k_{\mathcal{E}}(a_{0\mathcal{E}}p + 1)}.$$

Для более общего случая можем записать

$$W_{РОС}(p) = \frac{(d_{0\mathcal{E}}^* - d_0^*)p^2 + (d_{1\mathcal{E}}^* - d_1)p + (d_{2\mathcal{E}}^* - d_2)}{k_{\mathcal{E}}^*(a_{0\mathcal{E}}p + 1)}.$$

В полученном выражении для передаточной функции регулятора, расположенного в цепи обратной связи, степень полинома числителя m больше степени полинома знаменателя n . Следовательно, для упрощения способа технической реализации эталонную модель можно подобрать таким образом, чтобы обеспечивалось равенство параметров $d_{0\mathcal{E}}^* = d_0^*$. Отсюда следует, что при реализации управления в ЭМС с БДПТ при $t \rightarrow \infty$ можно обеспечить достижение целей управления ($e(t) \rightarrow 0$) для любого ограниченного входного сигнала и произвольных ограниченных начальных условиях как для объекта исследования, так и для эталонной модели.

Переход к задаче синтеза адаптивной системы возможен, если произвести в приведенных выше выражениях замену неизвестных рабочих параметров настраиваемыми. При технической реализации при этом потребуются включение в структурную схему дополнительного адаптивного наблюдателя.

Синтез адаптивного наблюдателя может быть реализован при использовании канонической формы представления модели объекта

$$\dot{y} = \begin{pmatrix} -d_{1k} & 1 \\ -d_{2k} & 0 \end{pmatrix} y + \begin{pmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \end{pmatrix} u,$$

где параметры модели определяются следующими выражениями [3]:

$$d_{1k} = d_1 k_b, \quad d_{2k} = k_b, \quad a_{1k} = k_a, \\ a_{2k} = a_2 k_a, \quad k = \frac{k_a}{k_b}.$$

При идентификации параметров объекта управления и оценивании его состояний по измеряемому входному (управляющему) сигналу $u(t)$ и выходной координате $y(t)$ для реальных ЭМС с БДПТ, в которых относительная степень $\mu = (m-1) \gg 1$, нельзя обойтись без информации о производных до $(\mu-1)$ – порядка, что будет противоречить условиям задачи. Однако в случае необходимости данную информацию можно получить с адаптивного наблюдателя системы и в последующем использовать для идентификации параметров объекта. Возможные ошибки при идентификации и уходе рабочих параметров будут оказывать влияние на точность управления.

В заключение заметим, что эталонная модель для ЭМС с БДПМ может быть технически реализована в виде реального динамического звена (т.е. в виде физической (явной) модели), а также в неявном виде, в виде эталонного управления. Исследования рабочего тока и угловой частоты вращения БДПТ, проведенные на математической модели [1, 6], свидетельствуют об улучшении рабочих параметров и динамических характеристик, а также о повышении точности процесса управления в системе. Формирование управляющих функций для каждой из m подсистем БДПТ по углу между полем ротора и статора Θ , учитывающих информацию о предыдущих состояниях, позволит сформировать в ЭМС с БДПТ режим энергосбережения и обеспечить точность позиционирования.

Литература

1. Овчинников, И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций [Текст] / И.Е. Овчинников. — СПб.: КОРОНА-Век, 2006. — 336 с.
2. Овчинников, И.Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока [Текст] / И.Е. Овчинников, Н.И. Лебедев. — Л.: Наука, 1979. — 270 с.

3. Овчинников, И.Е. Теория вентильных электрических двигателей [Текст] / И.Е. Овчинников. — Л.: Наука, 1985. — 164 с.

4. Винокуров, С.А. Комплексная математическая модель электромеханической системы с бесконтактным двигателем постоянного тока [Текст] / С.А. Винокуров // Вестник Воронежского государственного технического университета: Сер. «Вычислительные и информационно-телекоммуникационные системы». — 2001. — Вып. 8.1 — С. 84-87.

5. Винокуров, С.А. Оценка влияния угла между полем ротора и статора на коэффициент передачи системы с бесконтактным двигателем постоянного тока [Текст] / С.А. Винокуров, О.А. Павленко // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сб. трудов. Вып. 7.— Воронеж: ВГТУ, 2002. — С. 35-36.

6. Винокуров, С.А. Исследование процесса коммутации и динамики бесконтактных двигателей постоянного тока [Текст] / С.А. Винокуров, В.Е. Букатова, О.А. Киселёва // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2008. — Т.4. — №3. — С. 83-85.

7. Кирилов, А.Б. Исследование влияния угла между полем ротора и статора на рабочий ток бесконтактного двигателя постоянного тока [Текст] / А.Б. Кирилов, С.А. Винокуров // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники. Инженерные идеи XXI века: труды Всеросс. науч.-техн. конф.— Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», — 2013. — С. 50-51.

8. Букатова, В.Е. Исследование влияния угла коммутации и углового фазового сдвига на динамические характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока [Текст] / В.Е. Букатова, С.А. Винокуров, О.А. Киселёва // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2008. — Т.4. — №2. — С. 155-158.

9. Рипс, Я.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами [Текст] / Я.А. Рипс, Б.А.Савельев. — М.: Энергия, — 1974. — 248 с.

10. Винокуров, С.А. Надежность и эксплуатация систем автоматического управления [Текст] / С.А. Винокуров, В.Е. Букатова. — Воронеж: ВГТУ, — 2002. — 132 с.

11. Винокуров, С.А. Модель исследования функциональной надежности электромеханических систем с бесконтактным двигателем постоянного тока [Текст] / С.А. Винокуров // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2006. — Т.2. — №7. — С. 87-90.

12. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник [Текст] / Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-ое, стереотипное. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с.

13. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

14. Фомин, В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами [Текст] / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А.Якубович. — М.: 1981. — 447 с.

15. Винокуров, С.А. Синтез адаптивного непрямого управления в электромеханических системах с бесконтактным двигателем постоянного тока [Текст] / С.А.Винокуров, О.А. Киселева, В.Е Букатова // Промышленная информатика: Межвуз. сб. науч. тр.— Воронеж: ВГТУ, — 2006. — С. 86-90.

THE SIMULATION ON DINAMICAL CHARACTERISTICS OF ADAPTIVE ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

S.A. Vinokurov, Candidate of Technical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: stvinokurov@rambler.ru

The paper deals with the peculiarities of simulation methodology of current characteristics in adaptive electromechanical system with brushless direct current motor, corresponding mathematic dependences are given. The investigation results of brushless direct motor angle between rotor and stator pole insurance on motor functional current are given. With using of mathematical model dependences the brushless direct current motor current characteristics without angle between rotor and stator and with 10° angle dependences are investigated. The summary results on dynamical characteristics and energetic of brushless direct current motor electromechanical system with using in mathematical model of parameters influence of the angle between rotor and stator pole of motor are given. Corresponding mathematic dependences and influence characteristics are suggested. The synthesis methodology of indirect adaptive control of brushless direct current motor electromechanical system is suggested, the corresponding transfer functions for system process investigation are given. The structural scheme of control forming with ideal regulator is suggested, the transfer functions for system with regulator direct or feedback location are also considered. The article results practical use will take energy saving control in brushless direct current motor electromechanical system with its dynamical characteristics improvement.

Key words: electromechanical system, brushless direct current motor, adaptive control

References

1. Ovchinnikov I.E. Ventilnie elektricheskie dvigateli i privod na ich osnove (Malaya i srednaya moshnost) [Ventil Electrical Motors and electrical drives on their base] — SPb.: CORONA-Vek, 2006. — 336 p.
2. Ovchinnikov I.E., Lebedev N.I. Beskontaktnie dvigateli postoyannogo toka [Brushless Direct current motors] — L.: Nauka, 1979. — 270 p.
3. Lebedev N.I. Teoriya ventilnich elektricheskikh dvigateley [The theory of ventil electrical motors] — L.: Nauka, 1985. — 164 p.
4. Vinokurov S.A. Komplexnaya matematicheskaya model elektromechanicheskoy sistemy s beskontaktnim dvigatelem postoyannogo toka [Mathematical treatment and simulation of the brushless direct current motor electromechanical system] // The Vestnik of the Voronezh State Technical University, No. 8.1. — 2001. — P. 84-87.
5. Vinokurov S.A., Pavlenko O.A. Otzenka vliyaniya ugla mezhdru polem rotora i statora na coefficient peredachi sistemy s beskontaktnim dvigatelem postoyannogo toka [The simulation of the dependence of angle between rotor and stator on transfer coefficient in brushless direct current motor electromechanical system] // Modern problems of informatization in techniques and technologies, No. 8.1. — Voronezh: Voronezh State Technical University, 2002. — P. 35-36.
6. Vinokurov S.A., Bukatova V.E., Kiseleva O.A. Issledovanie kommutatsii i dinamiki beskontaktnih dvigateley postoyannogo toka [Investigation of commutation process and dynamics of brushless direct current motors] // The Vestnik of the Voronezh State Technical University, — 2008. — T.4. — №3. — P. 83-85.
7. Kirilov A.B., Vinokurov S.A. Issledovanie vliyaniya ugla mezhdru polem rotora i statora na rabochii tok beskontaktnogo dvigatelya postoyannogo toka [The investigation of the angle between rotor and stator pole on brushless direct current motor current] // The Electro mechanics, energy and electronics practice insurance. XXI Age engineering ideas: All-Russian scientific research conference abstracts. — Voronezh: Voronezh State Technical University, — 2013. — P. 50-51.
8. Bukatova V.E., Vinokurov S.A., Kiseleva O.A. Issledovanie vliyaniya ugla kommutatsii i uglovogo fazovogo sdviga na dinamicheskie karakteristiki beskontaktnogo dvigatelya postoyannogo toka [Investigation of commutation angle and angle phase displacement on dynamical characteristics of brushless direct current motor] // The Vestnik of the Voronezh State Technical University, — 2008. — T.4. — №2. — P. 155-158.
9. Rips A. Ya. Analis i raschet nadezhnosti sistem upravleniya elektropriivodom [Analysis and calculation of reliability of electrical drive control systems]. — M.: Energy, — 1974. — 248 p.
10. Vinokurov S.A., Bukatova V.E. Nadezhnost i expluatatzia sistem avtomaticheskogo upravleniya [The reliability and operation of automatic control systems].— Voronezh: Voronezh State Technical University, — 2002. — 132 p.
11. Vinokurov S.A. Model issledovaniya funktsionalnoy nadezhnosti elektromechanicheskikh sistem s beskontaktnim dvigatelem postoyannogo toka [The model of functional reliability research of electromechanical system with brushless direct current motor] // The Vestnik of the Voronezh State Technical University, — 2006. — T.2. — №7. — P. 87-90.
12. Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya [The robastive, neyro-unlogic and adaptive control methods] / Red. N.D. Yegupov. — M.: Moscow state Bauman's university, 2002. — 744 p.
13. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [The classical and modern automatic control theory methods] / Red. K.A. Pupkov, N.D. Yegupov. — M.: Moscow state Bauman's university, 2004.
14. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. Adaptivnoye upravlenie dinamicheskimi obiektami [The adaptive control on dynamical objects]. — M., 1981. — 447 p.
15. Vinokurov S.A., Kiseleva O.A., Bukatova V.E. Synthes adaptivnogo nepramogo upravleniya v elektromechanicheskikh sistemah s beskontaktnim dvigatelem postoyannogo toka [The adaptive un-direct control forming in brushless direct current motor electromechanical systems] // The plant informatics: Scientific research abstracts.— Voronezh: Voronezh State Technical University, — 2006. — P. 86-90.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НЕДВОИЧНОГО LDPC-ДЕКОДЕРА НА ПЛИС

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, С.Ю. Белецкая

В данной статье представлена модель эффективной аппаратной архитектуры для декодера, построенного на недвоичных блоковых кодах с низкой плотностью проверок на четность на основе стохастического вычисления. Разработанная архитектура ориентирована на устройства Xilinx Virtex и отчеты синтеза сведены в таблицу. Разработанная архитектура включает в свой состав три основных блока: недвоичный поток, переходящий в генератор стохастических чисел (преобразователь из недвоичного в стохастическое представление), декодирование алгоритмических модулей, а именно блок контрольных узлов и блок проверочных узлов, и обратное преобразование стохастического потока к соответствующему недвоичному числу. Разработанные блоки интегрированы в качестве верхнего модуля. Верхний модуль синтезируется, ориентирован на Xilinx Vertex и его метрики сведены в таблицу, произведен анализ мощности. Сделаны выводы о возможной дальнейшей оптимизации для модифицированной недвоичной архитектуры с использованием стохастического вычисления, и данная оптимизация также может быть использована для более высоких порядков поля Галуа с анализом различных параметров. Приведено моделирование в виде графиков зависимостей мощности, используемой различными логическими элементами в архитектуре, и зависимости температуры кристалла от мощности

Ключевые слова: недвоичный LDPC коды, стохастическое вычисление, архитектура декодера, проверочные и переменные узлы

Введение. Класс линейных блочных кодов с низкой плотностью контроля четности (LDPC), имеет превосходную производительность, близкую к пределу Шеннона. Недвоичные LDPC (NB-LDPC) являются расширением двоичного LDPC, работают на более высоких порядках поля Галуа. Конструкция эффективной аппаратной архитектуры для кода NB-LDPC зависит от различных факторов, таких как формат входного сообщения, длины кода, вида модуляции и типа канала. Недвоичные коды LDPC разработаны с лучшими показателями производительности с использованием стохастических вычислений. Повышенная сложность вычислений в NB-LDPC представляет серьезную проблему в аппаратной реализации архитектуры декодера.

Коды низкой плотности проверки на четность (LDPC) стали одними из наиболее привлекательных кодов коррекции ошибок из-за их отличной производительности [1] и используются в приложениях с высокой скоростью передачи данных. С точки зрения производительности, двоичные коды LDPC начинают показывать свои слабые стороны, когда длина кодового слова мала или умеренная, или используется для передачи при модуляции более высокого порядка. Для этих случаев недвоичные LDPC (NB-LDPC) коды, разработанные с использованием полей Галуа высокого порядка показали большой потенциал. LDPC-коды могут быть итеративно декодированы с использованием из-

вестного алгоритма SPA или его приближений, алгоритма min-sum (MSA). SPA является алгоритмом передачи сообщений, в котором два типа узлов обработки, известные как переменные узлы (VNs) и проверочные узлы (CNs) итерационно обмениваются сообщениями и вероятностями правильности символов, принятых из канала. Стохастическое декодирование [2] является недавно предложенным подходом к помехоустойчивым кодам низкой сложностью итеративного декодирования. Стохастические результаты представления простой структуры аппаратных средств для VNs и CNs. Что еще более важно, из-за его последовательно двоичной природы стохастическое представление значительно уменьшает количество соединений между VNs и CNs, что приводит к снижению сложности межсоединений архитектуры.

Стохастическое декодирование, тем не менее, подвержено проблемам задержек. Было замечено, что циклы в графе кода коррелируют стохастические сообщения таким образом, что группа узлов прикрепляется в фиксированных состояниях в течение нескольких итераций декодирования и резко ухудшает сходимость декодера.

Стохастическое вычисление. Стохастическое вычисление представляет собой совокупность методов, которые представляют собой непрерывные значения потоками случайных битов. Сложные расчеты могут быть вычислены с помощью простых побитовых операций на потоки. Основным преимуществом стохастического вычисления является очень низкие затраты на реализацию арифметических операций. Недостатком является экспоненциальное увеличение длины битового потока, соответствующее увеличению времени вычислений и низкой пропускной способностью. В NB-LDPC-

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kipr@vorstu.ru
Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru
Белецкая Светлана Юрьевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473)243-77-06, e-mail: kipr@vorstu.ru

декодере VNU имеет задержку в краевой памяти и является основным вопросом. Были предложены различные архитектуры для того, чтобы искоренить проблему защелкивания.

Защелкивание. Когда передаваемые символы в узле коррелируют, то можно сделать это и для группы узлов, чтобы быть в состоянии покоя. Это состояние поддерживается только сообщением в пределах цикла. Ни одна модель независимых сообщений не является достаточным для восстановления цикла для правильной работы. Это явление называется заперное.

NB-LDPC-декодер. Производительность стохастического декодирования имеет сравнимую производительность для различных значений SNR в отношении алгоритма декодирования SP (SPA). Проблема защелкивания описывается для стохастического декодирования. Этот метод имеет значительный потенциал для высокой пропускной способности или низкой сложности итеративного декодирования.

Для каждой итерации i , должны быть выполнены следующие шаги:

Инициализация. Для каждого m и n инициализируем значения $Q_{mn}^{a(0)}$ к f_n^a , т.е.

$$Q_{mn}^{a(0)} = f_n^a = \prod_{j=1}^m g_{n_j}^{a_j},$$

где a_i – i -й бит двоичного представления a .
Обновление проверочного узла:

$$R_{mn}^{a(i)} = \sum_{c: c_n = x} P(z_m = 0 | c) \prod_{n' \in N(m) \setminus n} q_{mn'}^{a(i)}$$

Обновление переменного узла:

Обновление для каждого m и n

$$q_{mn}^{a(i)} = a_{mn} f_n^a \prod_{m' \in M(n)} R_{m'n}^{a(i)}$$

Предварительное декодирование:

Для каждого n , сделать предварительное декодирование

$$q_n^{a(i)} = a_n f_n^a \prod_{m' \in M(n)} R_{m'n}^{a(i)}$$

$$x_n = \arg \max_x q_n^a$$

Если $N \cdot x$, декодирование завершается. В противном случае, повторяем итерационный процесс до тех пор, как декодирование не будет успешным или по достижении фиксированного максимального количества итерации.

Краевая память (от англ. Edge Memorie, EMs) является конечной глубиной буферов, вставленные между переменными и контрольными узлами. Выход, полученный из переменного узла принимается, когда ограничения равенства удовлетворяются, в противном случае символ случайным образом выбирается из сохраненного восстановленного символа. Этот метод имеет хорошую производительность

декодирования однако EMs занимает значительную площадь кремния при реализации в СБИС.

Вносимые изменения. Архитектура недвоичного LDPC-декодера изменяется в процессе преобразования. Начальный блок является недвоичным стохастическим преобразователем. Ввод недвоичных GF(4) данных сначала преобразуется в стохастический поток недвоичных символов. Следующий модуль декодирования состоит из блока проверочных узлов (CNU) и группы переменных узлов (VNU), где происходит процесс декодирования и, наконец, стохастический поток преобразуется в недвоичные данные.

Блоки преобразования. Преобразование от недвоичного числа к стохастическому числу является преобразованием, которое преобразует недвоичное число в стохастическом потоке символов. Для примера конечное поле для GF(4) работает над $\{0, 1, 2, 3\}$, соответственно. Генератор случайных чисел генерирует число случайным образом для каждого цикла синхронизации, для генерации случайных чисел линейного обратного сдвигового регистра (LFSR), который используется. LFSR представляет собой регистр сдвига, входом которого является линейная функция текущего состояния, зависящей от предыдущего состояния. В основном используется линейная функция одного бита XOR, таким образом, как правило, он представляет собой регистр сдвига, вход которого приводится в движение XOR некоторыми битами по всем значениям регистра сдвига. Различные применения LFSR счетчики, шифрование, сжатие, и генерации псевдослучайных битовых последовательностей.

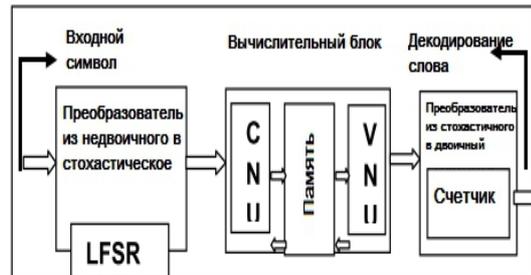


Рис. 1. Блок-схема для NB-LDPC-декодера с использованием стохастического вычисления

Блоки декодера. Блок проверочного узла (CNU) в недвоичных LDPC выполняет операцию сложения. Так как эквивалентное представление операции сложения в стохастической вычисление на вентилях XOR. Поток недвоичных символов задается в качестве входных данных для CNU, в котором делается добавление и хранится в триггере.

$$p_c = p_a(1 - p_b) + p_b(1 - p_a)$$



Рис. 2. Блок проверочного узла

Операция умножения происходит в блоке переменного узла (VN). Блок переменного узла недвоичного LDPC-декодера состоит из блока памяти и вентилях, таких как AND и XNOR соответственно.

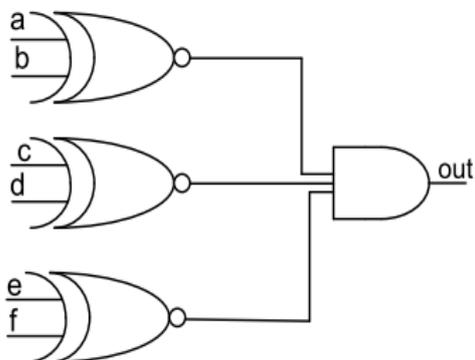


Рис. 3. Блок переменного узла

Случайный адрес задается в памяти в зависимости от того, какие данные извлекаются из ячейки памяти. Это блок образуют переменный узел в недвоичной архитектуре.

Использование устройства и анализ мощности. Верхний модуль для NB LDPC-декодера GF (4) 504 бит смоделирован и синтезирован в Vertex семейства Xilinx с использованием Xilinx ISE инструмента. Отчет представлен в табл. 1.

Таблица 1

Область NB LDPC-декодера GF (4) 504

Используемая логика	Используемая	Доступная
Количество регистров среза	4	301440
Число LUT-х	5	150720
Количество связанных IOBs	177	400
Количество BUF G/BUFG CTRLS	2	32
Количество занятых частей	4	37,680

Мощность рассчитана на синтезированном NB-LDPC-декодере конечного поля GF (4) с длиной кода 504 с использованием Xilinx, техническое описание представлено в табл. 2. На рис. 4 показан график для различных логик, используемых в проектируемой архитектуре и рис. 5 показывает график зависимости мощности от температуры перехода.

Таблица 2

Краткое описание анализа мощности для NB LDPC-декодера GF (4) 504

Итого по мощности микросхемы	2,729 Вт
температура перехода	28,1 °C
Тепловой запас	71,9° 62,2 Вт

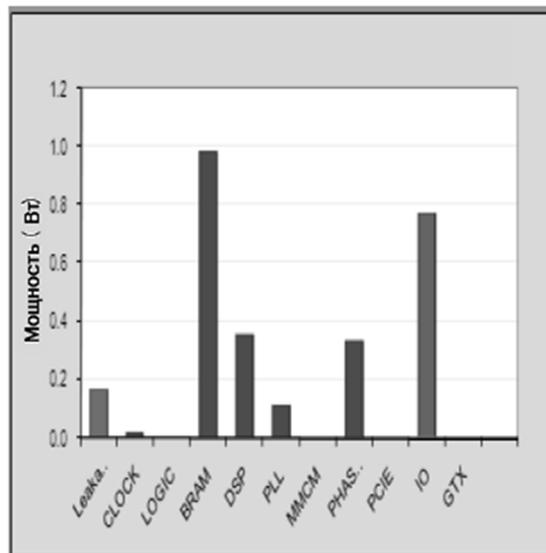


Рис. 4. Мощность, используемая различными логиками в архитектуре

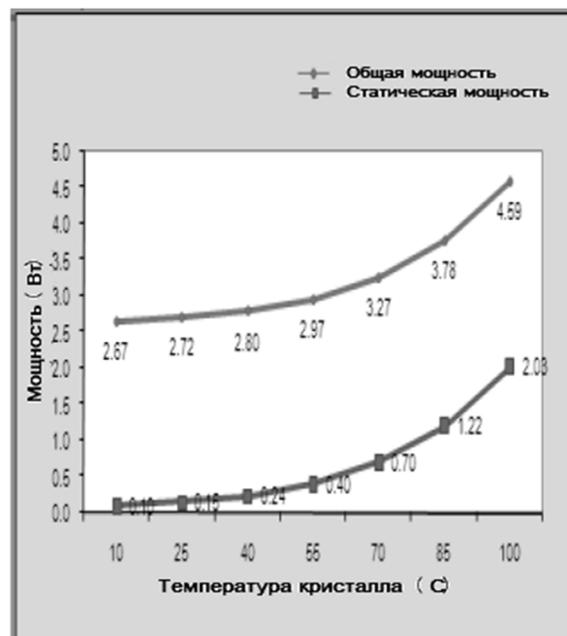


Рис. 5. Температура кристалла по сравнению с мощностью

Заключение. Стохастическое вычисление моделируется на основе архитектуры недвоичного LDPC-декодера. Разработанная архитектура включает в себя недвоичный поток, переходящий в генератор стохастических чисел, декодирование алгоритмических модулей, а именно CNU и VNU, а обратное преобразование стохастического потока к соответствующему недвоичному числу. Разработанные блоки интегрированы в качестве верхнего модуля. Верхний модуль синтезируется, ориентирован на Xilinx Vertex и его метрики сведены в таблицу и произведен ее анализ мощности. Может быть сделана оптимизация для модифицированной недвоичной архитектуры с использованием стохастического вычисления, и оно также может быть

распространен на более высокие порядки поля Гаула с анализом различных параметров.

Литература

1. D. E. Hocevar, «A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes,» in IEEE Workshop Signal Process. 2004.

2. J. Huang, S. Zhou, and P. Willett, “Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication,” IEEE J. Sel. Areas Commun., 2008.

3. V. Savin, “Min-Max decoding for non binary LDPC codes,” in Proc. (IEEE) International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008.

4. Ali Nandrei, Shie Mannor, Mohamad Sawan Warren J.Gross 2011. “Relaxed stochastic decoder of LDPC codes” IEEE transaction on signal processing vol 59 pp5617-5626.

5. Башкиров, А.В. Полностью параллельный не-двоичный LDPC-декодер с динамическим изменением частоты стробирования [Текст] / А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 4. – С. 48-53.

6. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 6. – С. 97-99.

7. Низкоплотностные коды малой мощности декодирования [Текст] / А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова, А.В. Ситников, С.А. Ермаков // Радиотехника. - 2016. - №5. - С. 32-37.

Воронежский государственный технический университет

USING STOCHASTIC CALCULATIONS FOR IMPLEMENTATION NON-BINARY LDPC DECODER FPGA

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kibr@vorstu.ru

M.V. Horoshaylova, Postgraduate of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru

S.Yu. Beletskaya, Doctor of Technical Sciences, professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kibr@vorstu.ru

This article presents a model of efficient hardware architecture for the decoder, built on non-binary block codes, low density parity check based on stochastic calculations. The developed architecture is focused on Xilinx Virtex devices and synthesis reports are summarized in the table. Once-worked architecture includes in its membership three main blocks: non-binary stream turns into a generator of stochastic numbers (converter of non-binary in stochastic representation), decoding algorithmically modules, namely a block control nodes and block check nodes, and the inverse transformation of the stochastic stream to the corresponding non-binary number. Designed as blocks integrated upper module. The top module is synthesized, it is focused on Xilinx Vertex and its metrics are summarized in the table, and produced power analysis. Conclusions about possible further optimization of the modified non-binary architecture using stochastic computing, and this optimization can also be used for higher-order Galois field with the analysis of the different parameters. Powered by modeling in a power dependency graphs used different logic elements in the architecture and the temperature dependence of the crystal of power

Key words: non-binary LDPC codes stochastic calculation, the architecture of the decoder, checking and variable nodes

References

1. D. E. Hocevar, A reduced complexity decoder architecture via layered decoding of LDPC codes,» in IEEE Workshop Signal Process. 2004.

2. J. Huang, S. Zhou, and P. Willett, Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication, IEEE J. Sel. Areas Commun., 2008.

3. V. Savin, Min-Max decoding for non binary LDPC codes, in Proc. (IEEE) International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008.

4. Ali Nandrei, Shie Mannor, Mohamad Sawan Warren J.Gross 2011. Relaxed stochastic decoder of LDPC codes IEEE transaction on signal processing vol 59 pp5617-5626.

5. Bashkirov A. V. Polnosty parallelniy nedvoichnyi LDPC-decoder s dinamichescim ismeneniem chastoti strobirovaniy [A fully parallel LDPC-binary decoder with a dynamic change in sampling frequency] Voronezh, VSTU 2016. 48-53 pp.

6. Bashkirov A. V. Realizachij LDPC – decoder na massivno-parallelnix vychislitelnix ystroystvah [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.

7. Bashkirov A. V. Niscoplotnostnie codi maloy moshnosti decodirovaniia [Low-density low-power code decoding] Radio engineering. 2016, pp 32-37.

РАЗРАБОТКА 10-БИТНОГО МАЛОМОЩНОГО АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В САПР CADENCE

А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев

В статье рассматривается проектирование 10-битного маломощного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения с частотой выборки 100кГц и потребляемой мощностью 0,145 мВт при напряжении питания 1,8В, выполненный по 180 нмБиКМОП технологии с использованием программных средств САПР Cadence. Использование КМОП технологии при синтезе цифровой части схемы, а также выбор архитектуры ЦАП (цифро-аналогового преобразователя), основанной на двоично-взвешенных переключаемых конденсаторах, потребляемая мощность которого не превышает 100 пВт, позволяет значительно повысить энергоэффективность предложенной схемы. Таким образом, компаратор имеет наибольшую рассеиваемую мощность, что делает задачу по снижению потребления компаратора приоритетной. Предложенная концепция использования тактируемого компаратора с отключаемым питанием в АЦП позволяет достичь снижения потребляемой мощности АЦП более чем в 2 раза по сравнению с типичной схемой. Относительно невысокая частота выборки описанной АЦП последовательного приближения позволяет нивелировать недостаток предложенного решения, которым является необходимость выхода в стабильный режим компаратора после каждого такта тактирования. Предложенные конструктивно-схемотехнические решения могут быть востребованы в мобильных системах, требующих высокой энергоэффективности

Ключевые слова: маломощный, АЦП последовательного приближения, ЦАП на переключаемых конденсаторах, тактируемый компаратор с отключаемым питанием, Cadence

Введение

Стремительное развитие портативной электроники вкупе со слабым развитием в области компактных аккумуляторов создаёт высокую потребность в маломощных аналого-цифровых преобразователях. Наиболее выигрышной архитектурой в данном случае является АЦП последовательного приближения. Кроме того, при реализации АЦП предложено использовать цифро-аналоговый преобразователь на основе матрицы переключаемых конденсаторов, для достижения более низкого энергопотребления. Подобный ЦАП также обеспечивает лучшую линейность по сравнению с резистивными матрицами.

Архитектура АЦП ПП

Архитектура АЦП последовательного приближения показана на рис. 1.

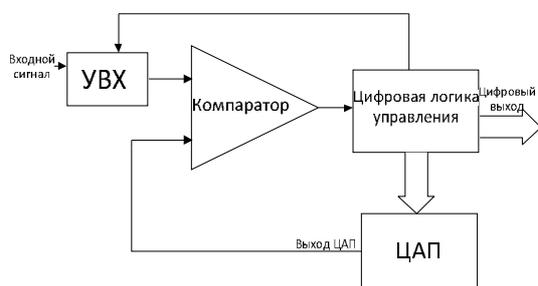


Рис. 1. Структурная схема АЦП последовательного приближения

В её состав входят: устройство выборки хранения (УВХ), компаратор, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), и цифровая управляющая логика, основной частью которой является регистр последовательного приближения [1].

На входе схемы находится УВХ представляющее собой аналоговый комплементарный ключ и конденсатор, на котором «запоминается» значение входного сигнала. В режиме выборки ключ открыт и напряжение на конденсаторе соответствует напряжению на входе схемы. Как только процесс аппроксимации первой выборки начинается ключ закрывается и входное значение хранится до начала следующей выборки [2]. Использование УВХ также решает проблему «дребезга» компаратора и позволяет использовать более быструю энергоэффективную архитектуру компаратора без гистерезиса [3].

Проектирование компаратора

Выход УВХ подключен к компаратору, который является одним из наиболее значимых блоков АЦП. Компаратор можно рассматривать как однобитный АЦП. От точности работы компаратора зависит точность преобразования. Кроме того, наибольшая доля потребляемой мощности приходится именно на него. Как видно из рис. 2 неотъемлемой частью компаратора является источник тока, представляющий собой транзистор, на затвор которого подается сигнал для задания тока смещения.

Недостатком известных схемных решений компараторов является постоянное протекание тока, даже в то время когда компаратор неактивен. Данную проблему удалось решить включением в схему комплементарного ключа, перед источником тока [4].

Строгонов Андрей Владимирович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: andreistrogonov@mail.ru
Жигульский Серафим Вячеславович – ОАО «СКТЬ ЭС», аспирант, e-mail: jiguls@yandex.ru
Пожидаев Вадим Сергеевич – ОАО «СКТЬ ЭС», аспирант, e-mail: vadim.s.pozhidaev@gmail.com

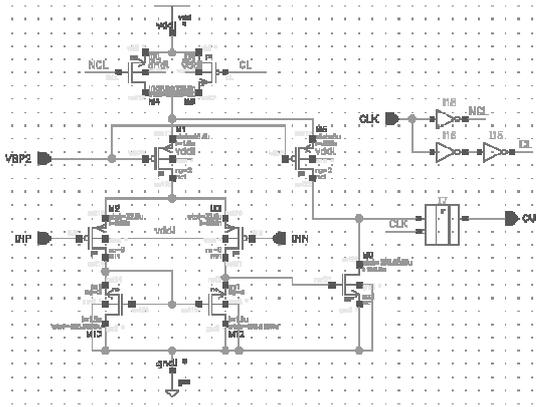


Рис. 2. Электрическая схема отключаемого стробуемого маломощного прецизионного компаратора

В то время как обычные тактируемые компараторы только «подтягиваются» к одному из логических уровней в неактивном режиме, описанное решение позволяет полностью отключать компаратор на время низкого уровня сигнала тактирования (рис. 3), т.е. снижать энергопотребление вдвое. Таким образом, удалось снизить потребляемую мощность компаратора с 0,350 мВт до 0,136 мВт. Основной проблемой использования предложенного схемотехнического решения является то, что требуется некоторое время на то, чтобы компаратор смог «выйти в активный режим». Однако относительно невысокая скорость работы АЦП последовательного приближения позволяет нивелировать эту проблему.

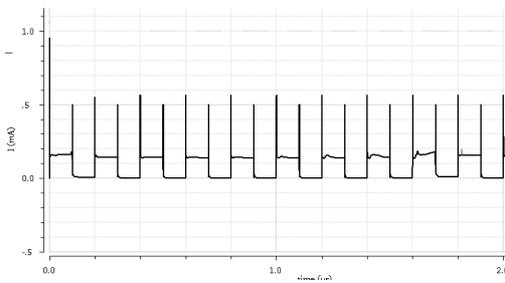


Рис. 3. График потребляемого компаратором тока

Проектирование ЦАП

Ко второму входу компаратора подключается выход ЦАП, архитектура которого представляет собой двоично-взвешенные переключаемые конденсаторы, выполненные в верхних слоях медной металлизации. Для снижения уровня «глитч» эффекта и улучшения линейности схемы ЦАП управляющие ключи и конденсаторы масштабируются согласно своему весу [5].

Алгоритм работы ЦАП задается посредством цифровой управляющей логики. На старте работы АЦП происходит сброс верхних обкладок конденсаторов. Далее старший значащий разряд ЦАП устанавливается в «1», что соответствует половине величины опорного напряжения 1 В. В зависимости от

результата сравнения на компараторе это значение сохраняется (в случае если входное напряжение больше), либо сбрасывается. Далее в «1» устанавливается следующий за старшим разряд и процедура выполняется вплоть до младшего значащего разряда (МЗР). По окончании преобразования на выходе появляется сигнал готовности для считывания данных параллельного интерфейса [6].

Симуляция и экспериментальные данные

Полный цикл преобразования 10 битного АЦП последовательного приближения представлен на рис. 4.

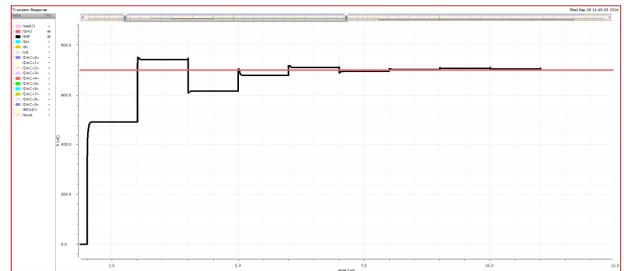


Рис. 4. Результаты моделирования АЦП

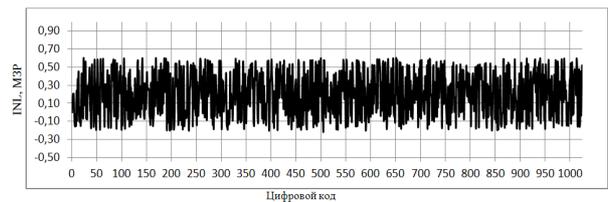
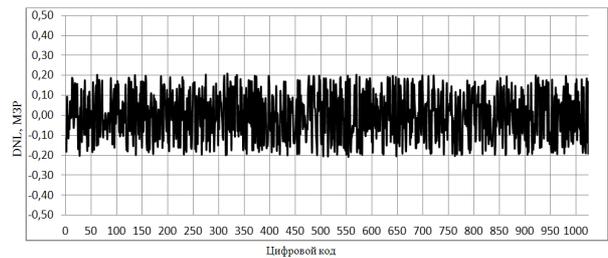


Рис. 5. Дифференциальная (DNL) и интегральная (INL) нелинейности АЦП

На рис. 5 показана интегральная (INL) и дифференциальная (DNL) нелинейность АЦП. Как видно из рис. 5 интегральная нелинейность не превышает 0,5 МЗР, а дифференциальная 1 МЗР.

Выводы

Разработана схема маломощного 10-битного АЦП последовательного приближения с частотой выборки 100 кГц. Такие конструктивно-схемотехнические решения как использование ЦАП на основе двоично-взвешенных переключаемых конденсаторов, и применение отключаемого компаратора без гистерезиса позволили добиться значения потребляемой мощности в 0,145 мВт.

Литература

1. Эннс В.И. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: краткий справочник разработчика/ В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 454 с.
2. Rudy J. van de Plassche CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters / Springer. 2003. 640 p.
3. A Rai Analysis and Design of High Speed Low Power / Abhishek Rai, 2B Ananda Venkatesan - IJEDR Vol 2, Issue 1, 2014, 1015-1020 p.

4. P. Balla High Speed and Low Power Double-Tail Comparator using Switching Transistor / Padmaja Balla, Yamini Devi Ykuntam / International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 3, Issue 11, 2014, 8453-8458 p.

5. B. Razavi, Deign of Analog CMOS Integrated Circuits / Tata McGraw-Hill, Delhi, 2002. 686 p.

6. Строгонов, А.В. Проектирование контроллера для 8-битного АЦП последовательного приближения с частотой выборки 75 МГц с использованием средств САПР Cadence [Текст] / А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - №2. - С. 75-77.

Воронежский государственный технический университет

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

DESIGN OF LOW POWER A 10-BIT, 100 kS/s SAR ADC by ADE Cadence

A.V. Strogonov, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: andreistrogonov@mail.ru

S.V. Zhigulskyi, Postgraduate, SKTB ES, Voronezh, Russian Federation, e-mail: jiguls@yandex.ru

V.S. Pozhidaev, Postgraduate, SKTB ES, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vadim.s.pozhidaev@gmail.com

The article considers the design of low-power 10-bit 100kS/s successive approximation analog-to-digital converter (ADC) with power consumption of 0,145 mW at 1.8V supply voltage. Device is formed by 180 nm BiCMOS technology by Cadence ADE software. Using of the BiCMOS technology in the synthesized digital part, as well as the using of the binary weighted capacitor array DAC significantly reduce the power consumption of these parts of the circuit. Since power consumption of DAC consumes less 100 pW. Thus a comparator becomes the most consuming part of the circuit. Consequently, the problem of reducing the power consumption of the comparator is primal. The proposed concept of power dynamic latched comparator allows to achieve half of typical scheme power consumption. Relatively low sampling rate of described successive approximation ADC allows to make negligible the disadvantage of the proposed solution, which is time required for stable work of comparator after every time clock. The proposed scheme can be applied in mobile systems requiring low power consumption

Key words: low power, ADC SAR, switched capacitor DAC, Power Dynamic Latched Comparator, Cadence

References

1. Ehnns V.I. Proektirovanie analogovyh KMOП-mikroskhem: kratkij spravochnik razrabotchika/ V.I. EHnns, YU.M. Kobzev. – М.: Goryachaya liniya – Telekom, 2005. – 454 p.
2. Rudy J. van de Plassche-CMOS Integrated Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters / Springer. 2003. 640 p.
3. A Rai Analysis and Design of High Speed Low Power / Abhishek Rai, 2B Ananda Venkatesan - IJEDR Vol 2, Issue 1, 2014, 1015-1020 p.
4. P. Balla High Speed and Low Power Double-Tail Comparator using Switching Transistor / Padmaja Balla, Yamini Devi Ykuntam. - International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 3, Issue 11, 2014, 8453-8458 p.
5. B. Razavi, Deign of Analog CMOS Integrated Circuits / Tata McGraw-Hill, Delhi, 2002. 686 p.
6. Strogonov A.V. Designing of a control logic of 8-bit, 75 Ms/s SAR ADC by Cadence EDA / A.V. Strogonov, S.V. Zhigulskyi, V.S. Pozhidaev // Vestnik VGTU. 2016. - Т. 12. - №2. - P. 75-77.

ДВУХКАНАЛЬНАЯ КОМБИНАЦИОННАЯ САМОСИНХРОННАЯ СХЕМА С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

С.Ф. Тюрин

Одно из перспективных направлений развития современной цифровой схемотехники – самосинхронные схемы (ССС). СССР не требуют тактового генератора, могут работать на ультранизких напряжениях питания, что обеспечивает их энергоэффективность, кроме того они самопроверяемы относительно достаточно широкого класса неисправностей. СССР характеризуются двухфазной дисциплиной функционирования. В фазе гашения (или в фазе спейсера) происходит передача одинакового уровня сигнала по линиям парафазных переменных, в рабочей фазе сигналы инверсны. С помощью такой дисциплины, соответствующих так называемых индикаторов и гистерезисных триггеров (С-элементов Маллера) обеспечивается индицируемость выходов всех элементов СССР.

С целью реализации пассивно отказоустойчивой СССР анализируется двухканальная комбинационная СССР и предлагается способ восстановления информации. Поскольку в рабочей фазе информация передаётся в парафазном коде, то введены дополнительные инверторы. Для обеспечения гашения (фазы спейсера) используются транзисторы разрешения.

Описывается разработанный восстановитель информации на основе избыточной транзисторной структуры, парирующий однократный отказ в рабочей фазе или в фазе гашения. Делается вывод о возможности реализации отказоустойчивой СССР на основании предложенного подхода

Ключевые слова: двухканальная комбинационная самосинхронная схема, рабочая фаза, фаза гашения (спейсера), восстановитель информации

Самосинхронные схемы (ССС), основы анализа и синтеза которых сформировал Д. Маллер (США) ещё в 50-е, 60-е годы XX века [1-4] в настоящее время пока не имеют такого широкого распространения, как синхронные и даже асинхронные. Но в условиях, когда всё уменьшающиеся технологические нормы проектирования и производства цифровых интегральных микросхем (ИС, а фактически почти уже наносхем) вплотную подводят нас к линии, за которой уже нельзя не учитывать квантовые эффекты, интерес исследователей и инженеров к ним растёт постоянно. Уже созданы самосинхронные кристаллы [5], в России, в Московском институте проблем информатики Российской академии наук (ИПИ РАН) активно работает исследовательская группа Степченкова Ю.А.

На основе БМК в технологическом центре МИЭТ создана обширная библиотека элементов для проектирования самосинхронных полужаказных ИС [6-9].

Самосинхронная схема строится по двухканальному принципу – имеется основной и двойственный каналы (например, для одновыходной комбинационной цифровой схемы реализуется двойственная логическая функция) на которые подаются либо парафазный входной вектор (переменная + её

инверсия), либо так называемый спейсер (полностью нулевой или полностью единичный вектор). На рис. 1 выходы некоторой логической функции Z основного и не Z двойственного каналов подключены к так называемому индикатору.

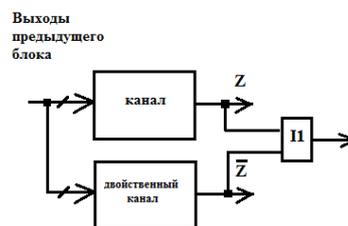


Рис. 1. Самосинхронная схема с индикатором I 1

Используется двухфазная дисциплина вычислений. В фазе спейсера (или гашения) индикаторы формируют сигналы её окончания, например, ноль в случае использования единичного спейсера и элемента 2ИЛИ-НЕ. В рабочей фазе, подаётся входной парафазный вектор и, когда выходы двух каналов примут взаимно инверсные значения, что означает завершение переходного процесса, то на выходе индикатора будет сформирована единица. Эти сигналы индикаторов анализируются специальными гистерезисными триггерами (Г триггерами или элементами Маллера, С-элементами) с целью формирования очередной фазы гашения и передачи результата вычислений в следующий блок. Таким образом, имеется избыточность и в варианте, изображённом на рис.1 она больше 100%. Избыточность пока и «отпугивает» разработчиков, кроме того, методы

Тюрин Сергей Феофентович – ПНИПУ, д-р техн. наук, профессор. e-mail: tyurinsergfeoo@yandex.ru; тел. +7-952-32-02-510

автоматизированного синтеза и анализа ССС реальной размерности находятся в стадии формирования. Что касается надёжности ССС, то часто декларируется свойство обнаружения константных отказов, но фактически это свойство может быть использовано только при наличии дополнительной аппаратуры (например, фиксатора-счётчика допустимого максимального времени переходного процесса) в активно отказоустойчивой аппаратуре, требующей перерыва в работе для восстановления (и аппаратуры восстановления-реконфигурации и резервного оборудования), что не всегда возможно для так называемых «онлайн» задач. В то же время возможности создания пассивно отказоустойчивых самосинхронных схем не нашли должного отражения в доступных автору источниках, можно сделать вывод о том, что теория пассивно отказоустойчивых самосинхронных схем только формируется. Поставим задачу разработки способа восстановления информации в ССС без троирования на основе их исходной избыточности. После введения второго канала вычислений той же логической функции Z схема с учётом рис. 1 становится фактически четырёхканальной – рис. 2.

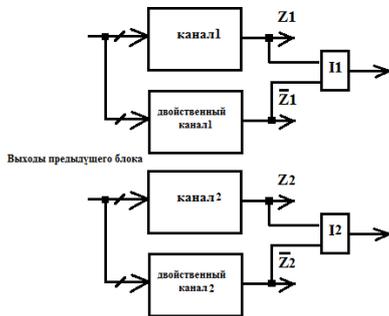


Рис. 2. Самосинхронная схема с двумя каналами 1, 2 и двумя индикаторами I1, I2

Анализ схемы рис. 2 рассмотрен в [8] и представлен рис. 3.

Z1	Z1-bar	Z2	Z2-bar	№ Набора	F(Z1 Z1-bar Z2 Z2-bar)	Ошибка g	Примечание
0	0	0	0	0	0	0	Спейсер нулевой
0	0	0	1	1	0	1	Ошибка выдачи 0 или нулевого спейсера
0	0	1	0	2	1	1	Ошибка нулевого спейсера или выдачи 1
0	0	1	1	3	~	1	Двукратная ошибка
0	1	0	0	4	0	1	Ошибка выдачи 0 или нулевого спейсера
0	1	0	1	5	0	0	выдача 0
0	1	1	0	6	~	1	Двукратная ошибка
0	1	1	1	7	0	1	Ошибка единичного спейсера или выдачи 0
1	0	0	0	8	1	1	Ошибка выдачи 1 или нулевого спейсера
1	0	0	1	9	~	1	Двукратная ошибка
1	0	1	0	10	1	0	выдача 1
1	0	1	1	11	1	1	Ошибка единичного спейсера или выдачи 1
1	1	0	0	12	~	1	Двукратная ошибка
1	1	0	1	13	0	1	Ошибка единичного спейсера или выдачи 0
1	1	1	0	14	1	1	Ошибка единичного спейсера или выдачи 1
1	1	1	1	15	1	0	Спейсер единичный

Рис. 3. Таблица анализа самосинхронной схемы с двумя каналами 1, 2

Рис. 3 показывает, что ошибка обнаруживается без фиксации фазы, но

восстановить значение правильного сигнала невозможно.

При задании наборов таблицы истинности рис. 3 на карте Карно получаем диагональ из нулевых клеток 0000,0101,1010,1111, поэтому минимизированная функция ошибки имеет вид (1):

$$g(Z_1 \bar{Z}_1 Z_2 \bar{Z}_2) = (\bar{Z}_1 Z_2) \vee (\bar{Z}_1 \bar{Z}_2) \vee (\bar{Z}_1 Z_2) \vee (Z_1 \bar{Z}_2). \quad (1)$$

В [8] не рассмотрена возможность восстановления информации при однократном отказе и только в рабочей фазе. А, учитывая наличие фактически четырёх копий одной и той же информации (это в классификаторе Федерального Института Промышленной Собственности называют не очень благозвучно – расчленением (на взгляд автора лучше бы звучало учетверение) в противовес дублированию и троированию) в двух каналах, каждый из которых имеет основной и двойственный каналы, это возможно и весьма несложными средствами [8-10]. С учётом вышесказанного восстановитель информации X не X в двухканальной самосинхронной схеме может иметь вид – рис. 4.

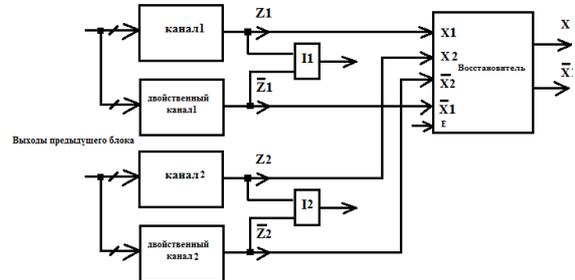


Рис. 4. Восстановитель информации X не X в двухканальной самосинхронной схеме

Восстановление информации возможно только при наличии одного отказа в четвёрке входных сигналов Z1, не Z1, Z2, не Z2 путём реализации функции (2):

$$\bar{X} = X_1 \bar{X}_1 \vee X_2 \bar{X}_2. \quad (2)$$

Такая функция реализуется на основе КМОП транзисторов так, как указано на рис.5.

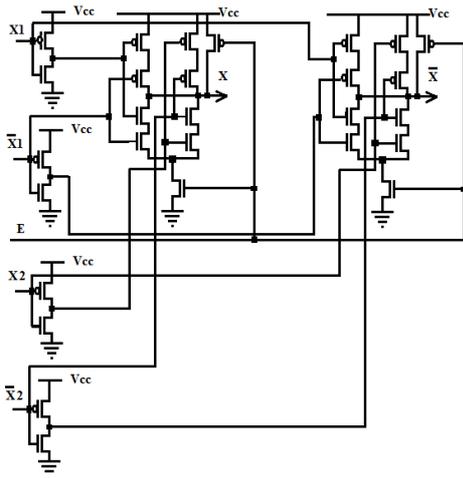


Рис. 5. КМОП реализация восстановителя с разрешением

Для восстановления информации с двойственного канала используем функцию (3):

$$X = X_1 X_1 \vee X_2 X_2. \quad (3)$$

Структура восстановителя включает четыре инвертора, а также дополнительный транзистор для реализации фазы спейсера по входу разрешения E. Таким образом, всего необходимо 28 транзисторов.

С целью повышения надёжности восстановитель следует дублировать. Тогда схема с дублированным восстановителем информации X1, не X1, X2, не X2 будет иметь вид рис.6.

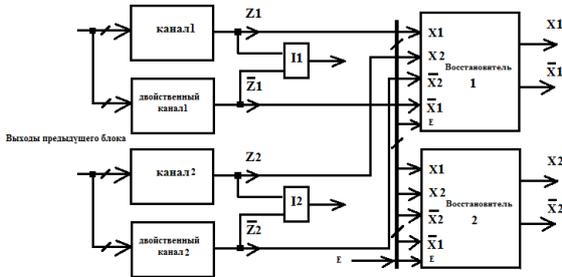


Рис. 6. Дублирование восстановителя информации в двухканальной CCC

Дублирование восстановителя информации в двухканальной CCC требует наличия гистерезисного триггера Г-триггера). То есть на выходах восстановителей 1,2 следует предусмотреть индикаторы I3, I4, и выходы всех индикаторов необходимо подать на входы Г триггера – рис. 7.

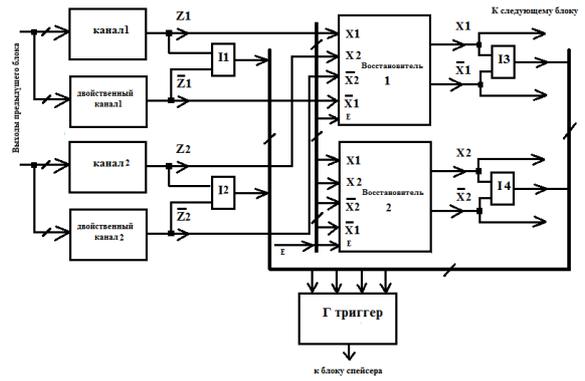


Рис. 7. Восстановитель информации с учётом гистерезисного триггера

Выход Г триггера подаётся на блок спейсера. Целесообразно использовать отказоустойчивый Г триггер с расчлениванием [7]. В таком случае создаётся дополнительная возможность парирования отказа одного индикатора из четырёх.

Кодированная таблица переходов предлагаемого Г триггера с выбором 3 из 4-х изображена на рис. 8.

Код состояния y(t)	Наборы входных переменных и состояния памяти												Примечание					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	a
1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	b
1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	c
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	d
0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Исходное
1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	Завершение ППЗ из 4-х y(t+1)

Рис. 8. Кодированная таблица переходов предлагаемого Г триггера с выбором 3 из 4-х.

Минимизация функции y(t+1) методом поразрядного сравнения рабочих и запрещённых двоичных наборов позволяет получить выражение

$$y(t+1) = bcd \vee acd \vee abd \vee abc \vee y(t) \quad (4)$$

$$(cd \vee bd \vee bc \vee ad \vee ac \vee ab).$$

Выполняем двойную инверсию выражения (4):

$$y(t+1) = \frac{\overline{\overline{bcd \vee acd \vee abd \vee abc \vee y(t)}}}{\overline{\overline{cd \vee bd \vee bc \vee ad \vee ac \vee ab}}}. \quad (5)$$

Раскрывая нижнюю инверсию и проводя упрощения, получим под инверсией исходное выражение, в котором переменные проинверсированы в связи с самодвойственностью функции (4):

$$y(t+1) = \frac{\overline{\overline{bcd \vee acd \vee abd \vee abc \vee y(t)}}}{\overline{\overline{cd \vee bd \vee bc \vee ad \vee ac \vee ab}}}. \quad (6)$$

Группируя члены выражения (6), получим

$$y(t+1) = \frac{\overline{\overline{(bc \vee ac \vee ab)d \vee abc \vee y(t)}}}{\overline{\overline{[(c \vee b \vee a)d \vee (c \vee a)b \vee ac]}}}. \quad (7)$$

Тогда КМОП реализация Г триггер может выглядеть так, как изображено на рис. 9.

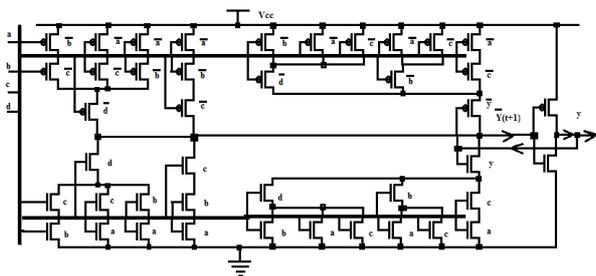


Рис. 9. Схема электрическая принципиальная КМОП реализации Г триггера с выбором 3 из 4-х

Легко видеть, что предложенный Г триггер с выбором 3 из 4-х сводится к обычному Г триггеру на 2 входа только при попарном объединении входов, например, $a=b$, $c=d$; $a=c$, $b=d$ и $a=d$, $b=c$. Обеспечивается возможность использования предлагаемого гистерезисного триггера в резервированных самосинхронных схемах, учитывающих возможность отказа в одном из четырёх каналов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный восстановитель информации в двухканальной ССС позволяет обеспечить пассивную отказоустойчивость ССС путём парирования ошибки в одном из каналов – в основном или в двойственном. Помимо КМОП реализации функции расщепления структура восстановителя включает четыре инвертора и имеет сложность 28 транзисторов при учёте необходимости восстановления парафазной информации X , \bar{X} . При дублировании восстановителей в следующий блок, в котором имеется свой восстановитель, также подаётся четвёрка сигналов. При введении индикаторов на выходах восстановителей возникает дополнительная возможность использования отказоустойчивого Г триггера.

В дальнейшем целесообразно более подробно рассмотреть процедуры смены фаз, а также вопрос оптимизации затрат на

восстановление, так как в минимальном варианте восстановление можно предусмотреть только на выходе всего устройства, а в максимальном – на выходе каждого из его блоков или узлов. Отдельного рассмотрения требует вопрос резервирования регистровых схем, так как там имеются внутренние связи, что делает невозможным восстановление информации, подобное комбинационным СС-схемам.

Литература

1. Muller D. E., Bartky W. S. A theory of asynchronous circuits [Text] // Proc. Int Symp. On the Theory of Switching, Part 1. – Harvard University Press, 1959. – pp. 204–243.
2. Аperiodические автоматы / под ред. В.И. Варшавского. – М.: Наука, 1976. – С.304.
3. Аperiodическая схемотехника [Текст] / В.И. Варшавский, В. Б. Мараховский, Л. Я. Розенблюм и А. В. Яковлев // В кн. Искусственный интеллект, т.3: Программные и аппаратные средства; под ред. В. Н. Захарова и В. Ф. Хорошевского. – М.: Радио и связь, 1990.
4. Yakovlev A. Energy-modulated computing [Text] // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011. – IEEE, 2011. – pp. 1-6.
5. Hollosi B. Delay-insensitive asynchronous ALU for cryogenic temperature environments [Text] // Circuits and Systems, 2008. MWSCAS 2008. 51st Midwest Symposium on. – IEEE, 2008. – pp. 322-325.
6. Библиотека элементов для проектирования самосинхронных полужказных микросхем серий 5503/5507 и 5508/5509 [Текст] / Ю.А. Степченко, А.Н. Денисов, Ю.Г. Дьяченко, Ф.И. Гринфельд, О.П. Филимонов, Н.В. Морозов, Д.Ю. Степченко. — М.: ИПИ РАН, 2008. — 296 с.
7. A.N. Kamenskikh, S.F. Tyurin. Advanced Approach to Development of Energy-Aware and Naturally Reliable Computing Systems [Text]. Proceeding of the 2015 IEEE North West Russia Section Young researchers in electrical and electronic engineering conference (2015 EIConRusNW). Pp 67-69
8. Kamenskikh, A.N., Tyurin, S.F. Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability [Text] // Proceedings of the 2014 IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – EIConRusNW 2014. pp. 47-50.
9. Kamenskikh, A.N., Tyurin, S.F. Features that provide fault tolerance of self-synchronizing circuits [Text] // Russian Electrical Engineering. – 2015. pp.672-682.
10. Ульман Дж. Д. Вычислительные аспекты СБИС [Текст]. пер. с англ.: А.В. Неймана / Дж. Д. Ульман. под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Радио и связь, 1990. – 480 с.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

A DUAL CHANNEL COMBINATIONAL SELF-TIMED CIRCUIT WITH RECOVERY

S.F. Tyurin, Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: tyurinsrgfeo@yandex.ru

One of the promising directions of development of modern digital circuit design - self-timed circuits (STC). STC does not require a clock can operate at ultra-low power supply voltages, which ensures energy efficiency, in addition, they self-checking

regarding a sufficiently broad class of failures. They are characterized by a two-phase functioning. During first phase, called spacer, is transmitted on the same signal lines variables in operating phases are inverse signals. With such discipline, corresponding to the so-called indicators and hysteresis trigger (C-elements Muller) is provided the displayed output of all elements of the STC. In order to implement a passive fault-tolerant dual-channel STC analyzes the combination STC and provides a method of data recovery. Since the operating phase, the information is transferred in paraphase code, additional inverters introduced. For quenching (phase spacer) used transistors permission. Describes developed a reducing redundant information based on the transistor structure, parrying a single failure in the working phase or phase cancellation. Conclusions on the possibility of implementing a fault-tolerant STC on the basis of the proposed approach

Key words: self-timed circuits, recovery

References

1. Muller D. E., Bartky W. S. A theory of asynchronous circuits // Proc. Int Symp. On the Theory of Switching, Part 1. – Harvard University Press, 1959. – p. 204–243.
2. Aperiodicheskie avtomaty: Pod redaktsiyey Varshavskogo V.I. – M.: Nauka, 1976. – p.304.
3. V.I. Varshavskiy, V. B. Marahovskiy, L. Ya. Rozenblyum i A. V. Yakovlev, § 4.3 Aperiodicheskaya shemotekhnika [Aperiodic circuitry], v kn. Iskusstvennyiy intellekt, t.3: Programmnyie i apparatnyie sredstva. Pod red. V. N. Zaharova i V. F. Horoshevskogo. M.: Radio i svyaz, 1990.
4. Yakovlev A. Energy-modulated computing //Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011. – IEEE, 2011. – pp. 1-6.
5. Hollosi B. Delay-insensitive asynchronous ALU for cryogenic temperature environments //Circuits and Systems, 2008. MWSCAS 2008. 51st Midwest Symposium on. – IEEE, 2008. – p. 322-325.
6. Yu.A. Stepchenkov. A.N. Denisov. Yu.G. Diachenko. F.I. Grinfeld. O.P. Filimonenko. N.V. Morozov. D.Yu. Stepchenkov. Biblioteka elementov dlya proyektirovaniya samosinkhronnykh poluzkaznykh mikroskhem seriy 5503/5507 i 5508/5509 [Library elements for designing self-timed chip semi-custom series 5503/5507 and 5508/5509] — M.: IPI RAN. 2008. — p. 296.
7. A.N. Kamenskikh, S.F. Tyurin. Advanced Approach to Development of Energy-Aware and Naturally Reliable Computing Systems. Proceeding of the 2015 IEEE North West Russia Section Young researches in electrical and electronic engineering conference (2015 ElConRusNW). pp67-69.
8. Kamenskikh, A.N., Tyurin, S.F. Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability // Proceedings of the 2014 IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – ElConRusNW 2014. pp. 47-50.
9. Kamenskikh, A.N., Tyurin, S.F. Features that provide fault tolerance of self-synchronizing circuits // Russian Electrical Engineering. – 2015. pp.672-682.
10. Dzh. D. Ul'man. Vychislitel'nye aspekty SBIS [Computational Aspects of VLSI] Per. s angl.: A.V. Nejmana. Pod red. P.P. Parhomenko. – M.: Radio i svyaz', 1990. – p.480.

РЕАЛИЗАЦИИ LDPC-ДЕКОДЕРА НИЗКОЙ СЛОЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА MIN-SUM

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, В.И. Борисов

Эта статья представляет собой ресурсоэффективную архитектуру декодера на основе низкоплотных кодов. Алгоритм, используемый для LDPC-декодирования, является min-sum алгоритмом. Декодер уменьшает сложность внутренних соединений путем ограничения внешней длины сообщения на 2 бита, а также упрощает работу проверочного узла. Проведено моделирование алгоритма и полученные результаты показывают, что производительность лучше, чем у других алгоритмов. Этот алгоритм может быть введен в частично параллельные архитектуры аппаратных средств, чтобы получить значительную экономию в аппаратных ресурсах при реализации в ПЛИС. Алгоритмы были смоделированы с использованием MATLAB и приведено сравнение BER производительности различных алгоритмов. Модифицированный алгоритм min-sum (MMS) обеспечивает более высокую производительность, а также может обеспечить значительное снижение аппаратных ресурсов при реализации. Были изучены различные типы аппаратной архитектуры. Общее время декодирования может быть уменьшено путем более быстрой сходимости алгоритма декодирования и простых вычислений. Полностью параллельная архитектура требует большого количества аппаратных ресурсов по сравнению с частично параллельной аппаратной архитектурой. MMS алгоритм при реализации в частично параллельной аппаратной архитектуре требует значительно меньших аппаратных средств для реализации

Ключевые слова: итеративное декодирование, LDPC-декодер, min-sum алгоритм, аппаратная архитектура, ПЛИС реализация

Введение. Матрица проверки на четность LDPC кода может быть представлена либо в виде матрицы, либо с помощью графе Таннера. Два набора узлов в графе Таннера называются контрольными узлами и переменными узлами. Проверочные узлы представляют строки матрицы и переменные узлы представляют собой столбцы матрицы. Матрица проверки на четность и соответствующий граф Таннера показаны на рис. 1.

Проверочный узел a подключен к переменному узлу b тогда и только тогда, если $H_{a,b}=1$. Проверочные узлы $f_0 \dots f_5$ представляют шесть строк матрицы, тогда, как $v_0 \dots v_{11}$ являются столбцами. Число ребер в каждом проверочном узле равно весу столба. Веса строк и столбцов являются четыре и два, соответственно, в этом примере. Цикл в матрице контроля по четности формируется путем чередования '1' записи с чередованием, перемещается между строками и столбцами. В графе Таннера цикл формирует путь, начинающийся от узла и заканчивается в том же узле. Длина цикла определяется как число ребер в пути. Самый маленький цикл на графе Таннера или матрицы контроля по четности называется его обхватом. Минимально возможный обхват – четыре. Двудольный граф имеет минимальный цикл длины четыре и даже продолжительность цикла.

Код LDPC называется регулярным, если каждая строка и каждый столбец имеют одинаковое

число единиц. Если каждая строка и каждый столбец имеет переменное число единиц, то LDPC код называется нерегулярным.

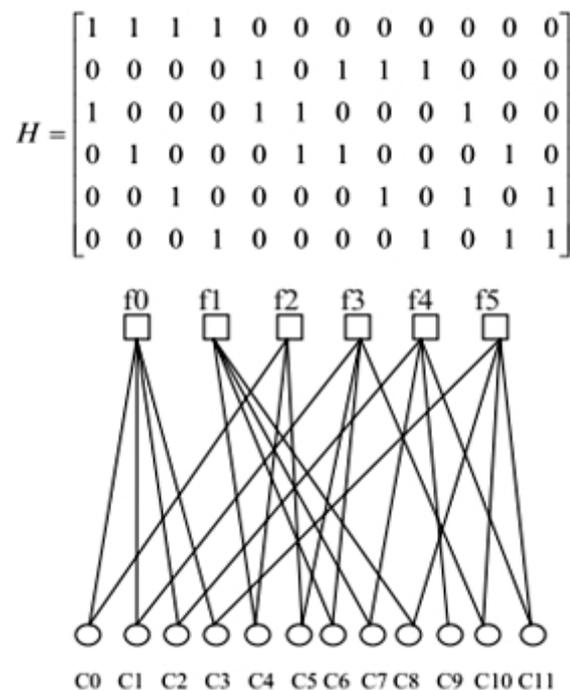


Рис. 1. Матрица контроля по четности и ее представление в виде графа Таннера

Построение LDPC кодов. Существует два пути построения LDPC кодов: Галлагера и Макея.

Галлагер коды – регулярные коды LDPC с H -матрицей вида

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: kivr@vorstu.ru
Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: pmv2205@mail.ru
Борисов Василий Иванович - АО «Концерн «Созвездие», д-р техн. наук, научный руководитель, тел. 8(473)252-12-13, e-mail: bvi@sozvezdie.su

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_n \end{bmatrix}$$

Каждая субматрица $H_d - \mu \times \mu w_r$ с весом строки w_r и весом столбца 1. μ и w_r – целые числа. Для $i = 1, 2, \dots, \mu$, i -ая строка содержит все свои w_r 1 в столбцах $(i-1)w_r + 1$ к w_r для H_1 .

Маккей коды формируются только в том случае, алгоритмы полу случайным образом генерируют разреженные матрицы H . H создается путем генерации случайным образом w_c столбцов и такого же веса строк, обеспечивая при этом вес w_r строк и не существует двух колонок с перекрытием больше, чем 1. Недостатком Маккей кода является то, что сложность кодирования очень высока.

Динамика и сложность. Производительность LDPC кодов лучше только для больших длин блоков. Большие длины блоков приводят к большой матрице контроля по четности и порождающей матрице. Редкую матрицу контроля по четности можно представить в виде [PTI] через исключения Гаусса. Из этого порождающая матрица может быть вычислена как $G = [I P]$. Матрица P не разрежена и, следовательно, сложность кодирования будет высокой. Так сложности строк с увеличением длины блока. Для уменьшения сложности используются итерационные алгоритмы декодирования.

Декодирование LDPC кодов. Наиболее распространенный способ для декодирования LDPC-кодов является алгоритм распространения доверия. Он также называется алгоритмом передачи сообщений или алгоритмом суммы продукта (SPA).

Учитывая передаваемое слово $c = \{c_0, c_1, \dots, c_{n-1}\}$ и принимаемое слово $v = \{v_0, v_1, \dots, v_{n-1}\}$ необходимо вычислить логарифмическое отношение правдоподобия (LLR) принятого символа. LLR определяется формулой (1).

$$L(v_i) = \log \left(\frac{\Pr(v_i = 0 | y_i)}{\Pr(v_i = 1 | y_i)} \right) \quad (1)$$

Если сигнал считается антиподальным и канал АБГШ, LLR для принятого символа канала задается формулой (2)

$$L(v_i) = 2y_i / \sigma^2 \quad (2)$$

Здесь y_i – принятый символ и σ^2 – напряжение шума. Эти сообщения передаются проверочными узлами становятся $L(q_{ij})$ от переменного узла i к проверочному узлу j . знак и величина $L(q_{ij})$ есть α_{ij} и β_{ij} соответственно.

На проверочных узлах эти сообщения обрабатываются и получается сообщение от проверочного узла к переменному узлу дается формулой (3).

$$L(r_{ji}) = \left[\prod_{i' \in V_j \setminus i} \alpha_{i'j} \right] \cdot \phi \left(\sum_{i' \in V_j \setminus i} \phi(\beta_{i'j}) \right) \quad (3)$$

$$\phi(x) = \log \left(\frac{e^x + 1}{e^x - 1} \right) \quad (4)$$

Сообщение $L(r_{ij})$ не зависит от сообщения, которое пришло из i -ого проверочного узла.

Переменный узел обрабатывает сообщение, полученное в соответствии с заданным уравнением

$$L(q_{ij}) = L(V_i) + \sum_{j' \in C_i \setminus j} L(r_{rji}) \quad (5)$$

Выше приведенное уравнение показывает, что сообщение из переменного узла к проверочному узлу является простым суммированием сообщений, приходящих из всех узлов, кроме проверочного узла j . Обработка сообщений обоими проверочным узлом и переменным узлом процессором эквивалентно одной итерации SPA.

После некоторого определенного количества итераций символы декодируются путем сравнения $L(Q_i)$ с порогом.

$$L(Q_i) = L(v_i) + \sum_{j \in C_i} L(r_{ji}) \quad (6)$$

Декодированный символ задается

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{если } L(Q_i) < 0 \\ 0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

Алгоритм min-sum. Алгоритм Min-Sum (MSA) является модифицированной версией алгоритма Sum-продукта (SPA). Здесь операция проверочного узла упрощается, чтобы уменьшить сложность алгоритма. В MSA, квантованное внутреннее сообщение, также известное как логарифмического отношение правдоподобия (LLR) и внешнее сообщение (между переменными и проверочными узлами) равны по длине. Следовательно, сложность аппаратной реализации увеличивается по мере увеличения длины квантованных сообщений. Уравнение обновление проверочного узла задается

$$L(r_{ji}) = \left[\prod_{i' \in V_j \setminus i} \alpha_{i'j} \right] \cdot \min_{i' \in V_j \setminus i} \beta_{i'j} \quad (8)$$

Квантование канала данных. Так как декодер не может работать на реальных значениях, необходимо квантовать их и квантованные значения импортируются в декодер.

На эффективность алгоритма влияет квантование мягких входных сообщений. Чем выше уровень квантования, тем выше будет требование аппаратных ресурсов. Когда уменьшаем уровень квантования, что приводит к снижению производительности BER. Квантование мягких входных сообщений влияет на производительность алгоритма min-sum. Квантование данных канала при LDPC

декодировании представлено на блок-схеме, показанной на рис. 2.



Рис. 2. Блок-диаграмма системы

Модифицированный алгоритм min-sum (MMS). MMS алгоритм использует более высокие точность LLR сообщений и более низкую точность (2-разрядная версия) внешних сообщений. Операции проверочного узла и переменного узла алгоритма MMS являются следующие:

1) Работа переменного узла. Этот алгоритм практически аналогичен алгоритму min-sum. Единственное отличие состоит в том, что переменный узел выполняет более высокую точность операций квантуется LLR и отображает результат на 2-битового сообщения. 2-битовое сообщение передается к контрольному узлу для последующей обработки. Операция переменного узла задается формулой (9).

$$V_i = g\left(LLR_n + \sum_{j \neq i} f(C_j)\right) \quad (9)$$

где $n=1, 2, \dots, N$ (переменные узлы) и $i=j=1, 2, \dots, d_v$ (степень переменного узла 'n')

$$g(y) = \begin{cases} 01 & y > T_m \\ 00 & 0 \leq y \leq T_m \\ 10 & 0 > x \geq -T_m \\ 11 & x < -T_m \end{cases} \quad (10)$$

$$f(x) = \begin{cases} +W & x = 01 \\ +w & x = 00 \\ -w & x = 10 \\ -W & x = 11 \end{cases} \quad (11)$$

где T_m – это порог для отображения, W является верхней целочисленной константой, а w нижней целочисленной константой.

2) Работа проверочного узла. В этом шаге XOR операция (M_k) используется, чтобы найти произведение знака входящих сообщений. Операция AND (S_k) используется для определения минимумов. Выходное сообщение (C_k) получается за счет объединения бит знака и бит величины.

$$S_k = V_1^{(S)} \oplus V_2^{(S)} \oplus \dots \oplus V_l^{(S)} \quad \forall l \neq k \quad (12)$$

$$M_k = V_1^{(M)} \oplus V_2^{(M)} \oplus \dots \oplus V_l^{(M)} \quad \forall l \neq k \quad (13)$$

$$C_k = \{S_k M_k\} \quad (14)$$

Сравнение производительности алгоритмов. Программная модель для алгоритмов SPA, min-sum (MSA) и модифицированного min-sum алгоритма (MMS) была создана и производительность BER каждого алгоритма строится с использованием MATLAB. Алгоритм прогрессивного роста ребер (PEG) используется для генерации LDPC ко-

дов. Коды были модулированы с использованием двоичной фазовой манипуляции (BPSK). Канал, используемый для передачи, является аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Расчеты были выполнены для 1200 длины битного кода при максимальной итерации 10. Рис.3 показывает сравнение производительности BER всех трех алгоритмов. Как видно из графика, что производительность алгоритма MMS лучше, чем MSA, но меньше, чем SPA. Сложность реализации алгоритма MMS намного меньше. Таким образом, это дает лучшую производительность, чем MSA и более низкую сложность аппаратной реализации, чем SPA.

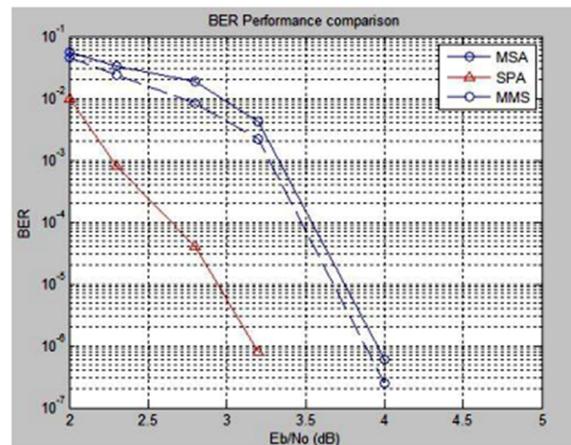


Рис. 3. Сравнение производительности алгоритмов декодирования

Архитектуры LDPC-декодера. В большинстве применений LDPC декодирование реализовано аппаратно, чтобы повысить скорость обработки. Архитектуры декодирования делятся на две основные категории: полностью параллельно и частично параллельно.

Полностью параллельные архитектуры напоминают граф Таннера матрицы контроля четности. Каждый узел графа Таннера отображается на узел обработки (проверочный узел и переменный узел) вместе со всеми соединениями, которые необходимы для передачи сообщений между ними. Узлы контрольные и переменные обрабатываются параллельно, и, таким образом, каждая итерация декодирования может быть сделана всего за один тактовый цикл. Преимущество полностью параллельной архитектуры является высокая пропускная способность, и она не нуждается в памяти для хранения промежуточных результатов. Полностью параллельная архитектура также является энергоэффективной. Проблема полностью параллельной конструкции является сложность, вызванная большим количеством длинных глобальных проводов между контрольными и переменными узлами. Он также требует большой площади контура. Полностью параллельная архитектура декодера показана на рис. 4.

В частично параллельной архитектуре, подмножество переменных узлов и проверочных узлов реализовано в виде аппаратных средств, а также

путем изменения маршрутизации в сети между узлами реализованы различные разбиения матрицы контроля по четности обрабатываются. Поскольку промежуточные сообщения должны быть сохранены, ресурсы памяти имеют важное значение для этой архитектуры. Одна итерация декодирования занимает несколько циклов. Таким образом, пропускная способность ниже по сравнению с полностью параллельными декодерами. Тем не менее, схема декодирования значительно меньше.

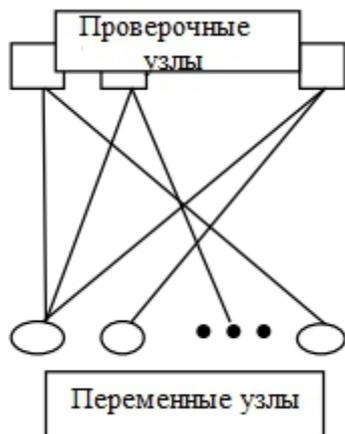


Рис. 4. Архитектура полностью параллельного LDPC-декодера

Большинство LDPC кодов, принятых в последних стандартах относятся к квазициклическая классу кодов. Матрицы проверки четности этих кодов блок-структурированы, что делает их пригодными для частично параллельных реализаций. Матрица контроля по четности для этого класса кодов строится меньшими суб матрицами; каждая представляет собой либо суб матрицу со всеми нулями или перестановочную единичную матрицу. Частично параллельная архитектура декодера показана на рис. 5.

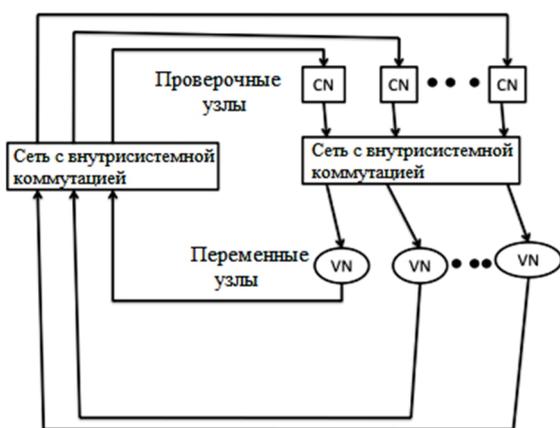


Рис. 5. Архитектура частично параллельного LDPC-декодера

Аппаратная реализация. Есть ряд вопросов, которые необходимо учитывать при проектировании аппаратной архитектуры для LDPC-декодера. В частично параллельной аппаратной архитектуре

большой объем памяти требуется для хранения промежуточных результатов. Несколько методов было предложено для уменьшения памяти декодера. Большинство методов используют МРА алгоритм или его приближения. Алгоритм min-sum снижает сложность за счет упрощения обновления проверки узла.

Декодирование задержки является еще одним важным фактором для большинства приложений. Общее время декодирования может быть уменьшено путем более быстрой сходимости алгоритма декодирования и простых вычислений. Полностью параллельная архитектура требует большого количества аппаратных ресурсов по сравнению с частично параллельной аппаратной архитектурой. Использование алгоритма MMS в частично параллельной аппаратной архитектуре обеспечивает большую экономию аппаратных ресурсов по сравнению с другими. Она также обеспечивает приемлемый уровень производительности BER. Алгоритм при включении частично параллельного проектирования аппаратных средств, предусматривает дальнейшее сокращение аппаратных средств потребности в ресурсах.

Закключение. В данной работе представлены различные алгоритмы для декодирования LDPC кодов. Алгоритмы были смоделированы с использованием MATLAB и приведено сравнение BER производительности различных алгоритмов. Алгоритм MMS обеспечивает более высокую производительность, а также может обеспечить значительное снижение аппаратных ресурсов при реализации. Были изучены различные типы аппаратной архитектуры. MMS алгоритм при реализации в частично параллельной аппаратной архитектуре требует значительно меньших аппаратных средств для реализации.

Литература

1. Gallager, R.G. (1962):Low density parity check codes,IRE Trans.Info.Theory, Vol. IT-8,pp.21-28.
2. Gallager, R.G. (1963):Low-Density Parity-Check codes,MIT press,Cambridge,MA.
3. Davey, M;Mackay, D. (1998):Low-density parity-check codes over GF(q),IEEE communication letter., vol.2, no.1, pp. 165-167,January.
4. Mackay, D.J;Neal, R. (1996):Near Shannon-Limit performance of low density parity-check codes,"vol. 32,pp. 1645-1646.
5. Башкиров, А.В. Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня [Текст] / А.В. Башкиров, Л.Н. Коротков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 1. - С. 65-69.
6. Башкиров, А.В. Реализация LDPC-декодера на массивно-параллельных вычислительных устройствах [Текст] / А.В. Башкиров, А.Ю. Савинков, М.В. Хорошайлова // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 6. - С. 97-99.

IMPLEMENTATION A LDPC DECODER OF LOW COMPLEXITY USING AN ALGORITHM MIN-SUM

A.V. Bashkirov, Ph.D., assistant professor of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru

M.V. Horoshaylova, postgraduate of design and manufacture of radio, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru

V.I. Borisov, Doctor of Technical Sciences, scientific adviser JSC Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation, e-mail: bvi@sozvezdie.su

This article is a resource-efficient decoder architecture based on low density codes. The algorithm used for the LDPC decoding algorithm is the min-sum. Decoder reduces complexity by limiting the internal connection posts on the outer circumference of 2 bits, and simplifies node checks. The simulation algorithm and the results show that the performance is better than the other algorithms. This algorithm can be introduced in a partially parallel architecture hardware to obtain significant savings in the hardware resources when implemented in a FPGA. The algorithms were simulated using MATLAB and compares BER performance of different algorithms. The modified algorithm min-sum (MMS) provides better performance, and can provide a significant reduction in the hardware resources in implementation. various types of hardware architectures have been studied. The total decoding time can be reduced by a more rapid convergence of the decoding algorithm and simple calculations. The fully parallel architecture requires a large amount of hardware resources, compared with a partially parallel architecture hardware. MMS algorithm when implemented in a partially parallel architecture hardware requires much less hardware for implementation

Key words: iterative decoding, the LDPC decoder, min-sum algorithm, hardware architecture, FPGA implementation

References

1. Gallager, R.G. (1962):Low density parity check codes,IRE Trans.Info.Theory, Vol. IT-8,pp.21-28.
2. Gallager, R.G. (1963):Low-Density Parity-Check codes, MIT press, Cambridge, MA.
3. Davey, M;Mackay, D. (1998):Low-density parity-check codes over GF(q),IEEE communication letter., vol.2, no.1, pp. 165-167,January.
4. Mackay, D.J;Neal, R. (1996):Near Shannon-Limit performance of low density parity-check codes,"vol. 32,pp. 1645-1646.
5. Bashkirov A. V. Model macshtabiruemogo LDPC – decoder nizkoy mochnosti s ispolzovaniem algoritmicheskogo sinteza vusokogo yrovnj [Model Low power LDPC-scalable decoder using the high-level algorithmic synthesis] Voronezh, VSTU 2016. 65-69 pp.
6. Bashkirov A. V. Realizachij LDPC – decoder na massivno-parallelnix vichislitelnix ystroystvah [Implementation of the LDPC-decoder on the massively parallel computing devices] Voronezh, VSTU 2015. 97-99 pp.

ПЛОСКИЕ АНТЕННЫ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ СВЧ И КВЧ С НИЗКИМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

В.В. Верейтин, Д.А. Ерошенко, Н.А. Ивочкин, А.И. Климов, К.А. Разинкин

Представлены результаты синтеза и компьютерного моделирования плоских антенных решеток вытекающей волны линейной поляризации с высоким коэффициентом усиления, оптимизированных для получения низкого уровня боковых лепестков диаграммы направленности в режиме нормального излучения в полосе частот 24–24,2 ГГц и 60,2–61 ГГц. Антенны содержат плоский диэлектрический волновод, одномерно-периодическую дифракционную решетку и устройство возбуждения диэлектрического волновода (полосковую гребенчатую линию или щелевой делитель мощности). Для снижения уровня боковых лепестков диаграмм направленности в Е- и Н-плоскостях в антеннах используются специальные апертурные распределения, формируемые, в частности, за счет вариации коэффициентов вытекания волн в ортогональных направлениях путем изменения конструктивных параметров структур (например, ширины металлических полосок дифракционной решетки, а также длин боковых выступов гребенчатой линии). В результате достигнуто снижение боковых лепестков до уровней $-(20...28)$ дБ. Лучший результат получен в антенне с волноводно-щелевым делителем мощности. Отмечается, что дальнейшее понижение уровня бокового излучения антенн может быть достигнуто за счет фазирования излучения элементов решеток путем варьирования периодов решеток

Ключевые слова: антенная решетка, вытекающие волны, апертурное распределение, диаграмма направленности, уровень боковых лепестков

Введение

В числе различных типов малогабаритных антенн с высоким коэффициентом усиления (28–30 дБ) для аппаратуры систем радиосвязи, охранных систем и радиолокационных устройств заслуживают внимания плоские антенны вытекающей волны (АВВ) [1]. Примером служат АВВ с параллельно-последовательным питанием, построенные на основе структуры в виде плоского диэлектрического волновода (ПДВ) с полосковую дифракционной решеткой (ДР), рассчитанные для излучения вдоль нормали к апертуре на минус первой пространственной гармонике (ПГ). АВВ такого типа характеризуются высоким коэффициентом полезного действия (КПД), и сравнимы по этому параметру с классическими волноводно-щелевыми решетками. Эффективность излучения АВВ, определяемая как произведение КПД и коэффициента использования поверхности (КИП), в диапазоне СВЧ достигает 65–75 %, благодаря чему коэффициент усиления (КУ) оказывается лишь на десятки доли децибела ниже коэффициента направленного действия (КНД).

Однако, антенны с параллельно-последовательным (центральным) питанием, постро-

енные на основе квазирегулярных периодических структур, обладают диаграммами направленности (ДН) с довольно значительным уровнем боковых лепестков (УБЛ), составляющим в среднем $-(13-15)$ дБ [1]. Данное обстоятельство может препятствовать широкому применению таких АВВ в приемопередатчиках систем радиосвязи, радиолокационных устройств и охранных систем в условиях высоких требований к помехозащищенности, диктующих необходимость снижения УБЛ до значений не более $-(20-25)$ дБ.

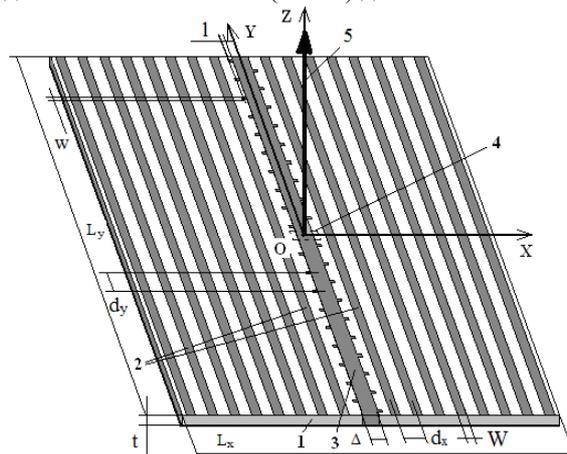


Рис. 1. Общий вид антенны с ГПЛ

Методика синтеза антенн

Рассмотрим АВВ с центральным питанием [2], эскиз которой показан на рис. 1. Антенна содержит ПДВ 1 (толщина t , относительная диэлектрическая проницаемость ϵ) на металлическом экране, две одномерно-периодических подрешетки 2 из параллельных металлических полосок

Верейтин Владимир Владимирович – ВГТУ, аспирант,
e-mail: lnzal@bk.ru

Ерошенко Денис Александрович – ВИ МВД России, преподаватель-методист, e-mail: den1is_90@mail.ru

Ивочкин Никита Андреевич – ВИ МВД России, курсант, e-mail: nikita.ivochkin@gmail.com

Климов Александр Иванович – ВИ МВД России, д-р техн. наук, доцент, e-mail: alexserkos@inbox.ru

Разинкин Константин Александрович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: mnac@comch.ru

(ширина полоски W , шаг (период) расположения d_x) и устройство 3 на основе гребенчатой полосковой линии (ГПЛ, ширина боковых выступов w , шаг (период) расположения d_y , длина l , ширина полоски Δ), предназначенное для возбуждения поверхностных волн в ПДВ. Размеры излучающей апертуры антенны $L_x \times L_y$. Питание антенны производится с помощью прямоугольного металлического волновода через щель связи 4 в центре экрана ПДВ. Направление максимального излучения антенны показано стрелкой 5. Для излучения вдоль нормали к апертуре на требуемой рабочей частоте шаг расположения полосок обеих дифракционных подрешеток d_x выбирается равным одной длине поверхностной волны, распространяющейся вдоль ПДВ в направлениях $\pm OX$, а шаг боковых выступов ГПЛ d_x — равным одной длине волны, распространяющейся вдоль ГПЛ. АВВ такого типа на основе квазирегулярной структуры с постоянными конструктивными параметрами ГПЛ и полосковых решеток, рассчитанные для режима нормального излучения, например, в полосе частот 24–24,2 ГГц при размерах раскрыва $L_x \times L_y = 116 \times 111$ мм², обладают коэффициентом усиления 28,5 дБ и ДН в Е- и Н-плоскостях с УБЛ в среднем около –15 дБ.

Хорошо известен способ снижения УБЛ ДН антенн, предполагающий формирование амплитудного распределения тока (поля) в раскрыве, спадающего по определенному закону в поперечных относительно центра раскрыва к его краям [3, 4]. Одним из таких распределений, обеспечивающих, например, УБЛ ДН не выше –20 дБ при синфазном возбуждении раскрыва (ширина ДН антенны длиной L определяется выражением $\theta_{0,5} \approx 58,4^\circ \lambda/L$) и высокий коэффициент использования ($\nu = 0,935$), является распределение вида «косинус на пьедестале» с $\Delta = 0,316$ [4]:

$$A(z) = \Delta + (1 - \Delta) \cos\left(\frac{\pi z}{L}\right), \quad (1)$$

Для синтеза АВВ с центральным питанием применена методика, обеспечивающая формирование заданного амплитудного распределения поля в раскрыве за счет изменения коэффициента ослабления α волн, распространяющихся в ПДВ и ГПЛ в направлениях $\pm OX$ и $\pm OY$. В [3] показано, что продольное распределение коэффициента ослабления волны питания за счет излучения из непрерывной структуры длиной L (без учета тепловых потерь) описывается выражением:

$$\alpha(z) = \frac{1}{2} \frac{|A(z)|^2}{\int_{-L}^L |A(z)|^2 dz + \frac{P_L}{P_0 - P_L} \int_0^L |A(z)|^2 dz}, \quad (2)$$

где $P_0 = I$ — мощность на входе; P_L — мощность в конце антенны, задаваемая с учетом требуемого КПД. В дискретной структуре вытекающей волны изменение коэффициента ослабления реализуется путем варьирования ширины полосок ДР W_n и шага

их расположения d_x (пример соответствующей оптимизации конструкции аналогичной несимметричной структуры вытекающей волны на основе диэлектрического волновода и полосковой дифракционной решетки, возбуждаемой с торца волновода, детально описан в [5]) и длин боковых выступов ГПЛ l_n . В рассматриваемом случае АВВ с центральным возбуждением ПДВ необходимо учесть следующие обстоятельства:

- структура является дискретной;
- для фазирования вытекающих волн от всех элементов структуры в требуемом направлении на заданной частоте при варьировании W_n и l_n необходимо изменять и значения периодов d_x и d_y , что обусловлено соответствующими зависимостями коэффициентов фазы β_x и β_y вытекающих волн;
- вследствие дисперсионных свойств структуры точная фазировка неизбежно будет нарушаться при изменении рабочей частоты;
- полосковые подрешетки, равно как и боковые выступы ГПЛ, разнесены относительно центра раскрыва.

Применительно к плоской АВВ СВЧ для частот 24–24,2 ГГц требуемые зависимости $\alpha(x)$ и $\alpha(y)$ в направлениях $\pm OX$ и $\pm OY$ рассчитаны по формуле (2) для $L_x/2 \times L_y/2 = 67 \times 56$ мм².

В процессе моделирования с помощью программы HFSS двухпортовых структур при различных значениях ширины W_n и длины l_n одинаковых излучающих элементов рассчитаны значения коэффициентов ослабления α с учетом полученных S -параметров структур (S_{21} – комплексного коэффициента передачи напряжения из порта 1 в порт 2). Для расчета использовано известное выражение $\alpha = -(1/L) \ln |s_{21}|$ [5]. Далее были построены графики зависимостей $\alpha(W_n)$ и $\alpha(l_n)$, по которым определены требуемые значения ширины полосок ДР W_n и длин боковых выступов ГПЛ l_n , обеспечивающие нужные значения α_n . Надо отметить, что для получения распределения (1) с учетом значений α_n , обеспечиваемых при физически реализуемых в конкретном примере W_n и l_n значения мощности на концах структуры P_L пришлось увеличить до 0,2. С учетом узкой полосы рабочих частот (24–24,2 ГГц) периоды решеток d_x и d_y оставлены неизменными. Полученные параметры W_n и l_n далее были использованы в конструкции новой антенны с пониженным УБЛ ДН.

Результаты моделирования антенн

На рис. 2–4 приведены результаты компьютерного моделирования с помощью программы Ansoft HFSS плоской антенны новой конструкции с размерами раскрыва $L_x \times L_y = 134 \times 112$ мм², полученные в полосе частот 23,8–24,6 ГГц.

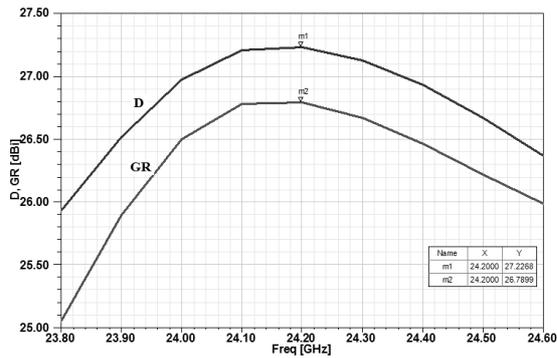


Рис. 2. Частотные характеристики КНД (D) и коэффициента усиления (GR) с учетом рассогласования по входу

ПДВ выполнен из материала Teflon с $\epsilon=2,1$; толщина $h=2$ мм; размеры щели связи в экране ПДВ для подключения к питающему волноводу – $11 \times 5,6$ мм². На рис. 2 показаны частотные характеристики КНД D и коэффициента усиления с учетом рассогласования по входу GR , на рис. 3 – частотная характеристика КСВ.

Максимальный КНД антенны D составил 27,2 дБ, коэффициент усиления коэффициента усиления с учетом рассогласования по входу $GR=26,8$ дБ при эффективности излучения 0,4.

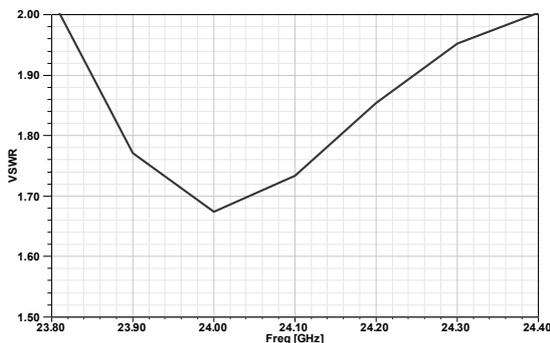


Рис. 3. Частотная характеристика КСВ ($VSWR$)

На рис. 4 а, б приведены примеры ДН антенны в виде угловых зависимостей КНД в Е- и Н-плоскостях на частоте 24,1 ГГц. Из приведенных на рис. 4 графиков следует, что УБЛ ДН новой антенны в сравнении с обычной снизился в Е-плоскости (XOZ) до $-21,5$ дБ, а в Н-плоскости (YOZ) $-23,2$ дБ. В полосе $23,8-24,4$ ГГц УБЛ ДН в обеих плоскостях не превышает -20 дБ.

Описанная выше методика также опробована на примере плоской АВВ с устройством возбуждения в виде волноводно-щелевого делителя мощности (ВЩДМ) [6]. Конструкция антенны поясняется рис. 7, на котором обозначено: 1 – экранированный ПДВ; 2 – элементы полосковых ДР; 3 – центральная полоска ДР с соединяющими ее с экраном ПДВ металлическими столбиками 4, образующая переменноразмерный волноводно-щелевой делитель мощности – устройство возбуждения поверхностных волн в ПДВ;

5 – короткозамыкатели на торцах ВЩДМ; 6 – отражающие металлические бортики на торцах ПДВ; 7 – направление максимального излучения антенны – главного максимума ДН.

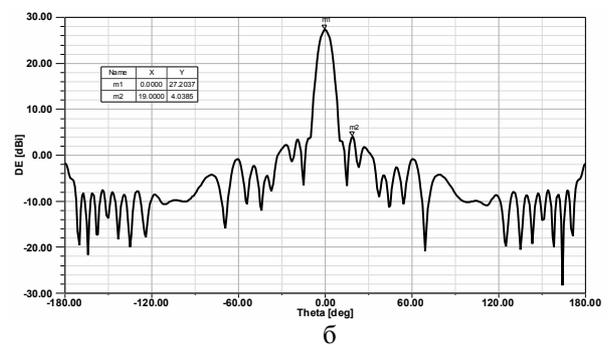
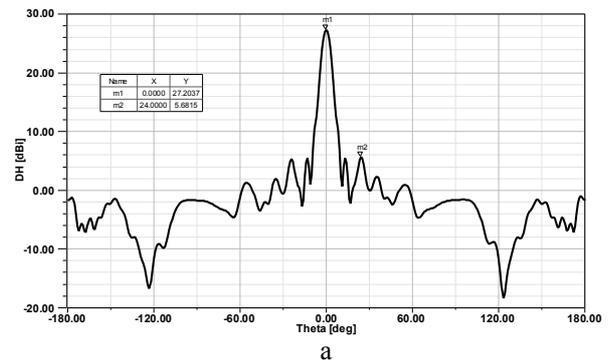


Рис. 4. ДН антенны на частоте 24,1 ГГц: в Е-плоскости (а); в Н-плоскости (б)

ВЩДМ может быть интегрирован в единую конструкцию с ПДВ с применением технологии SIW (Substrate Integrated Waveguide). На рис. 6–8 приведены результаты компьютерного моделирования с помощью программы HFSS плоской антенны новой конструкции КВЧ диапазона с размерами раскрытия $L_x \times L_y = 59 \times 61$ мм², полученные в полосе частот $60-61,5$ ГГц.

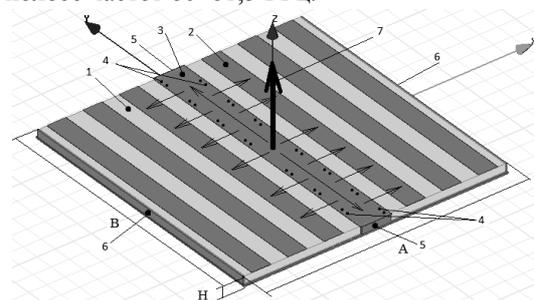


Рис. 5. Общий вид антенны с ВЩДМ

ПДВ выполнен из материала Rogers RT/Duroid 5880 с $\epsilon=2,2$; толщина $h=0,79$ мм; размеры входной щели для подключения к питающему волноводу – $3,8 \times 1,6$ мм².

На рис. 6 показаны частотные характеристики КНД D и коэффициента усиления с учетом рассогласования по входу GR , на рис. 7 — ча-

стотная характеристика КСВ. В данной антенне для снижения УБЛ ДН в Е-плоскости использована вариация ширины полосок подрешеток W_n , а для снижения УБЛ ДН в Н-плоскости – размещение короткозамыкателей 5 (рис. 5) на расстоянии, равном половине длины волны в ВЦДМ на средней рабочей частоте.

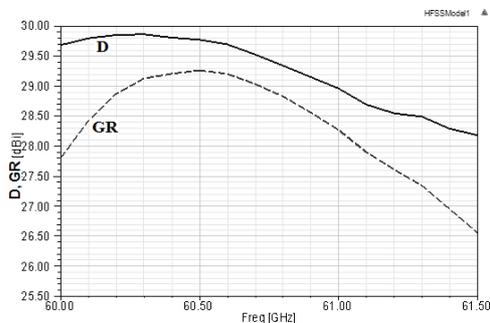


Рис. 6. Частотные характеристики КНД (D) и коэффициента усиления (GR)

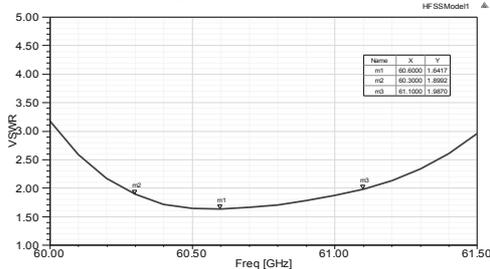


Рис. 7. Частотная характеристика КСВ ($VSWR$)

На рис. 8 а, б приведены примеры ДН антенны в Е- и Н-плоскостях на частоте 61 ГГц. Из приведенных на рис. 4 графиков следует, что УБЛ ДН в Е-плоскости (XOZ) составляет -28 дБ, в Н-плоскости (YOZ) -20 дБ. В полосе 60–61 ГГц УБЛ ДН в обеих плоскостях не превышает -19 дБ.

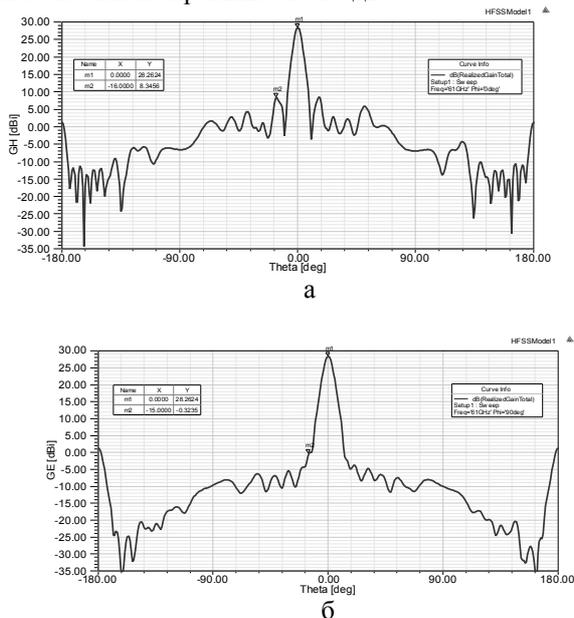


Рис. 8. ДН антенны на частоте 61 ГГц: в Е-плоскости (а); в Н-плоскости (б)

На частоте 60,5 ГГц значение КНД D составило 29,8 дБ, при этом КИП равен 0,531 (максимальное теоретическое значение $0,935 \times 0,75 = 0,701$).

Коэффициент усиления GR с учетом рассогласования по входу на частоте 60,5 ГГц равен 29,3 дБ, следовательно, эффективность антенны составляет 0,525. Ширина ДН в Е- и Н-плоскостях $\sim 6^\circ$.

Заключение

Приведенные выше результаты синтеза плоских АВВ СВЧ и КВЧ позволяют сделать вывод, что использованная методика в плане снижения УБЛ ДН антенны дает удовлетворительный результат. Дальнейшее улучшение характеристик антенны может быть достигнуто за счет фазирования излучения в направлении нормали к раскрытию путем варьирования шага расположения элементов полосковых подрешеток.

Таким образом, плоские антенные решетки вытекающей волны нормального излучения обладают значительным потенциалом в отношении формирования диаграмм направленности с низким уровнем боковых лепестков и могут рассматриваться как довольно перспективные в плане применения в приемопередающей аппаратуре СВЧ и КВЧ.

Литература

1. Борисов Д.Н. Плоская антенная решетка для радиоволновых охранных извещателей СВЧ диапазона / Ерошенко Д.А., Борисов Д.Н., Климов А.И., Нечаев Ю.Б. // Вестник Воронежского института МВД России, 2013. – Вып 4. – с. 253–257.
2. Пат. 2517724 С1 Российская Федерация, МПК⁷ H01Q13/28, H01P3/16. Плоская антенна вытекающей волны / Борисов Д.Н., Золотухин А.В., Климов А.И., Нечаев Ю.Б., Юдин В.И.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный университет. – № 2012144897/08; заявл. 22.10.2012; опубл. 27.05.04, Бюл. № 15. – 7 с.
3. Уолтер К. Антенны бегущей волны / Под ред. А.Ф. Чаплина. – М.: Энергия, 1970. – 448 с.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
5. Encinar, J. A. Analysis and CAD Techniques for Periodic Leaky-Wave Printed Antennas: Numerical and Experimental Results / J. A. Encinar // Int. Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 1994. – No 1. – V. 4. – P. 88–99.
6. Модификации плоских антенных решеток вытекающей волны / Ерошенко Д.А., Борисов Д.Н., Климов А.И., Нечаев Ю.Б. / XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015. - Омск, 2015. – 5 с.

**PLANAR SHF AND EHF LEAKY WAVE ANTENNAS
WITH LOW SIDE-LOBE LEVEL OF THE RADIATION PATTERN**

V.V. Vereitin, D.A. Eroshenko, N.A. Ivochkin, A.I. Klimov, K.A. Razinkin

V.V. Vereitin, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: 1nza1@bk.ru

D.A. Eroshenko, Teacher-Methodist of the Academic Council, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, e-mail: den1is_90@mail.ru

N.A. Ivochkin, Cadet, Voronezh Institute of the Interior of Russia, e-mail: nikita.ivochkin@gmail.com

A.I. Klimov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Voronezh Institute of the Interior of Russia, e-mail: alexserkos@inbox.ru

K.A. Razinkin, Professor, Doctor of Technical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mnac@comch.ru

The results of synthesis and computer simulation of a high gain linearly polarized planar leaky wave antenna arrays for broadside radiation, optimized for low (less than -20 dB) side-lobe level of the radiation pattern in the frequency bands of 24–24,2 GHz and 60,2–61 GHz. Antennas contain planar dielectric waveguide, one-dimensional periodic strip grating and the excitation device for the dielectric waveguide (strip comb line or slotted power divider). To reduce the side-lobe level of the radiation patterns in E- and H-planes, special aperture distributions are used in the antennas, in particular, by varying the leakage coefficients in orthogonal directions by changing the design parameters of the structures (for example, the width of the metal strips, as well as the length of lateral stubs of the comb line). As a result, the side lobe are reduced to the levels of $-(20 \dots 28)$ dB. The best result was obtained in the antenna with a slotted waveguide power divider. It is noted that further side radiation level reduction can be achieved by phasing of radiation of grating elements by varying periods of gratings.

Key words: antenna array, leaky waves, aperture distribution, radiation pattern, side-lobe level

References

1. Borisov D.N. Ploskaya antennaya reshetka dlya radiovolnovykh ohrannykh izveschateley SVCH diapazona [Planar antenna array for SHF security sensors] / Eroshenko D.A., Borisov D.N., Klimov A.I., Nechaev Yu.B. // Vestnik Voronejskogo instituta MVD Rossii, 2013. – Vyip 4. – s. 253–257.
2. Pat. 2517724 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK⁷ H01Q13/28, H01P3/16. Ploskaya antenna vyitekayushey volnyi [Planar leaky wave antenna array] / Borisov D.N., Zolotuhin A.V., Klimov A.I., Nechaev Yu.B., Yudin V.I.; zayavitel i patentoobladatel Voronejskiy gosudarstven-nyiy universitet. – № 2012144897/08; zayavl. 22.10.2012; opubl. 27.05.04, Byul. № 15. – 7 s.
3. Uolter K. Antennyi begushey volnyi [Traveling wave antennas] / Pod red. A.F. Chaplina. – M.: Energiya, 1970. – 448 s.
4. Ustroystva SVCH i antenyi. Proektirovanie fazirovannykh antenykh reshetok: Ucheb. posobie dlya vuzov [SHF devices and antennas. Design of phased antenna arrays] / Pod red. D. I. Voskresenskogo. M.: Radiotekhnika, 2012. – 744 s.
5. Encinar, J. A. Analysis and CAD Techniques for Periodic Leaky-Wave Printed Antennas: Numerical and Experimental Results / J. A. Encinar // Int. Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 1994. – No 1. –V. 4. – P. 88–99.
6. Modifikatsii ploskikh antenykh reshetok vyitekayushey volnyi [Modifications of planar leaky wave antenna arrays] / Eroshenko D.A., Borisov D.N., Klimov A.I., Nechaev Yu.B. / XI Mejdunarodnaya IEEE Sibirskaya konferentsiya po upravleniyu i svyazi SIBCON-2015, Omsk: 21–23 maya 2015. – 5 s.

**РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ СОБЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

П.Ю. Гусев, Ю.С. Скрипченко

В статье предлагается принцип создания имитационных моделей на основе событий технологических процессов. В первую очередь рассматривается метод имитационного моделирования применительно к исследованию производственных процессов машиностроительных производств. Рассмотрены 2 основных способа создания имитационных моделей: с использованием универсальных языков программирования и с использованием программных средств имитационного моделирования. Проведено исследование разработки имитационных моделей технологических процессов в программных комплексах имитационного моделирования, которое показало, что существующие программные комплексы недостаточно адаптированы для применения на российских машиностроительных производствах. На основании сделанных выводов сформулированы основные принципы создания имитационных моделей, обеспечивающие адаптацию к российским машиностроительным предприятиям. Первый принцип создания имитационных моделей основан на точном моделировании производственных подразделений с учетом масштаба. Такой подход позволит решать компоновочные и планировочные задачи предприятия. Второй принцип предполагает создание списка событий имитационной модели на основе технологических процессов, используемых в производственном процессе. На основе предложенного принципа разработан алгоритм формирования списка событий на основе технологического процесса. Проведено исследование влияния алгоритма на основные элементы имитационной модели, создаваемой на универсальном языке программирования. В статье также предложена обобщенная структура взаимодействия объектов в имитационной модели, созданной по предложенным принципам

Ключевые слова: имитационное моделирование, события, технологические процессы

Имитационное моделирование представляет собой один из самых востребованных методов исследования в таких областях науки как теория управления, теория массового обслуживания, теория исследования операций. Высокая эффективность имитационного моделирования содействовала развитию его применения в прикладных областях науки. Современная практика применения имитационного моделирования показывает эффективность применения данного метода при исследовании машиностроительных производств. В первую очередь это объясняется тем, что любое реальное производство представляет собой сложную систему. Описание подобной системы аналитическим способом возможно, но зачастую приводит к недостаточно точному результату.

Возможность исследования машиностроительных производств, с применением имитационного моделирования, основывается на представлении производства как системы. Такой подход осуществляется благодаря тому, что каждый структурный уровень предприятия отвечает признакам системы.

Также следует отметить, что каждый структурный уровень предприятия имеет гра-

ничные условия своего существования. Эти условия, прежде всего, позволяют организовать моделирование каждого структурного элемента по отдельности. Такой подход позволяет проводить исследование отдельных подразделений предприятия, ограничиваясь созданием небольших имитационных моделей. Затем, при необходимости, модели структурных элементов можно объединить и создать общую модель предприятия.

В настоящее время применяется 2 наиболее распространенных способа создания имитационных моделей:

1. разработка с применением универсальных языков программирования;
2. разработка с применением программных комплексов имитационного моделирования.

Создание имитационной модели на универсальном языке программирования представляет собой сложную задачу, требующую математической подготовки. Помимо математической подготовки разработчику имитационной модели требуется умение практического применения какого-либо из языков программирования. При этом, чем сложнее моделируемая система, тем сложнее будет разработка имитационной модели. Сложность разработки является не единственным фактором, повышающим трудоемкость создания модели на языке программирования. Зачастую задача создания имитационной модели на универсальном языке

Гусев Павел Юрьевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: gusevpvl@gmail.com

Скрипченко Юрий Степанович - ВГТУ, канд. техн. наук,
профессор, e-mail: skripch@yandex.ru

программирования воспринимается как исключительно программистская задача, при этом математическая часть значительно упрощается. В результате имитационная модель не отвечает поставленным требованиям и не корректно работает [2].

Разработка моделей с применением программных комплексов имитационного моделирования в настоящее время является основным способом создания имитационных моделей. В первую очередь это связано с тем, что создание имитационной модели в программном средстве требует значительно меньших затрат трудоемкости по сравнению с созданием аналогичной модели на универсальном языке программирования. В программных комплексах имитационного моделирования математическая часть уже программно заложена разработчиками комплекса. Также все основные функции имитационных моделей имеют свои логические представления в программном комплексе.

В подавляющем большинстве современных программных комплексов имитационного моделирования используется графический интерфейс и графическое представление имитационной модели. Это позволяет визуально оценить функционирование связей между объектами имитационной модели. Помимо этого, визуальный графический интерфейс упрощает работу с комплексом имитационного моделирования, что позволяет даже мало подготовленному человеку разработать имитационную модель. Это особенно важно при создании модели человеком, имеющим большой практический опыт работы с реальной системой, но не имеющим опыта моделирования.

Отдельно следует отметить особенности создания имитационной модели для машиностроительного предприятия или его части. Производство деталей и изделий на любом машиностроительном предприятии осуществляется по технологическим процессам. Сами технологические процессы имеют множество различных типов. В общем случае в машиностроении технологический процесс представляет собой последовательность операций направленных на создание конечного продукта. Поэтому при создании имитационной модели машиностроительного предприятия создаются имитации выполнения технологических процессов. Соответственно представления всех реальных объектов, которые затрагивает технологический процесс на производстве, необходимо представить в имитационной модели.

Для освещения недостатков существующего подхода к моделированию в комплексах имитационного моделирования при исследова-

нии машиностроительных производств необходимо рассмотреть пример создания модели. В качестве примера будет приведена методика создания имитационной модели в программном комплексе имитационного моделирования Tecnomatix Plant Simulation.

Следует отметить, что указанный программный комплекс позиционируется для использования в моделировании производственных систем. Дополнительным преимуществом является возможность использования комплекса в связке с PLM-системой Teamcenter. Основные объекты программного комплекса подходят для имитации оборудования, выполняющего операции по технологическому процессу. Это достигается следующим набором свойств имитируемых объектов:

- время обработки;
- время переналадки;
- вероятность неполадок на объекте
- возможность задания рабочих;
- имя объекта.

Создание имитационной модели в Tecnomatix Plant Simulation начинается с добавления в рабочую область имитаций объектов. Этот этап не представляет трудности даже для неподготовленного человека. Следующий этап создания имитационной модели – соединение добавленных в рабочую область объектов. Данный этап является также простым при условии использования в имитации одного технологического процесса. При исследовании двух и более технологических процессов возникают трудности в определении маршрутов движения детали. Связано это с тем, что реальные технологические процессы, используемые на отечественных предприятиях, невозможно загрузить в программное средство в исходном виде. Решение подобных проблем по выгрузке технологических процессов из PLM-системы рассматривается в работе[3]. Поэтому для загрузки технологических требуется создание таблиц с директивной технологией, которая отображает только название оборудования и время операции. При этом для корректной работы модели название оборудования необходимо преобразовывать в название латинскими буквами. Пример таблицы представлен на рис.1.

После создания таблиц с технологией необходимо создать элементы управления материальными потоками. Соответственно, чем больше номенклатура реального производства – тем больше трудностей возникает при создании и конфигурировании элементов управления материальными потоками. Само поведение

элементов управления задается при помощи встроенного псевдоязыка программирования. Не смотря на простоту конструкций встроенного псевдоязыка, общий программный код модели может оказаться в значительной степени сложным. Дополнительные сложности задает разнесения данного кода по различным методам.

bRAZMPLITA0	20:00.0000
bMC601F12G1	1:03:30.0000
bVerstMO1460	6:18.0000
bRF511	25:18.0000
bCHPU0	3:28:00.0000
bo1A641	1:06:54.0000
Buffer1	1.0000
Buffer1	1.0000
bo2622V1	3:45:18.0000
bo1M631	1:00:55.2000
bo1M631	1:54:11.4000
bMC601F12G1	2:13:33.6000
bVerstMO1460	6:40.8000
bo6R83G1	32:00.0000

Рис. 1. Пример таблицы в Tecnomatix Plant Simulation

Созданная имитационная модель в своем первоначальном варианте мало информативна. Для получения интересующих выходных данных необходимо дополнительно создавать таблицы и программные методы для сбора информации. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для работника машиностроительного предприятия, который попытается решить производственные задачи при помощи программного комплекса имитационного моделирования Tecnomatix Plant Simulation, не обойтись без дополнительного дорогостоящего обучения.

В связи с этим решено разработать принципы построения имитационных моделей на основе технологических процессов, используемых на отечественных предприятиях. Разработка таких принципов основывалась на решении следующих задач:

1. обеспечение возможности создания объектов имитационных моделей с привязкой к реальному технологическому оборудованию;
2. обеспечение возможности создания имитационных моделей с использованием технологических процессов машиностроительных производств в исходном виде.

Решение первой поставленной задачи основывается на реализации возможности зада-

ния таких свойств объекта в модели, которые имеет реальный объект. В первую очередь требуется возможность задание названия имитации технологического оборудования кириллицей. Это необходимо для того, чтобы название имитации объекта совпадало с название реального оборудования в технологическом процессе. Аналогичное решение требуется и для названий используемого инструмента.

Для создания имитационных моделей на основе технологических процессов требуется возможность создания модели с привязкой к реальному масштабу предприятия. В таком случае созданная имитационная модель позволит решать не только производственные задачи по расчету характеристик производства, но и задачи связанные с компоновочными и планировочными решениями производства. Решение этих задач напрямую связано с оптимизацией материальных потоков и поиском «узких» мест на машиностроительных предприятиях.

Исходные данные для создания имитаций объектов реального производства представляют собой текущие компоновочные и планировочные планы, состав технологического оборудования производства, применяемую транспортную систему. Для повышения адекватности имитационной модели может потребоваться корректировка исходных данных с учетом реальной производственной ситуации.

Решение второй задачи основывается на применении дискретно-событийного моделирования. Ввиду того, что технологический процесс можно представить как последовательность действий с определенным временным интервалом, то каждая операция технологического процесса может быть выделена в самостоятельно событие. При моделировании реальный технологический процесс необходимо выполнять по отдельным операциям. Во время выполнения имитации технологического процесса требуемое оборудование уже будет смоделировано по принципам, описанным выше. При этом постоянные связи между имитациями оборудования будут отсутствовать.

Ввиду того, что технологические процессы могут быть разных типов, следует выделить основные операции:

- подготовительные операции;
- основные операции (обработка, сборка и т.д.);
- вспомогательные операции;
- приемочный контроль и проверка качества.

Для того чтобы реализовать предложенный вариант выбора событий для имитационной мо-

дели, разработан алгоритм, описывающий этап создания списка событий на основе технологического процесса машиностроительного предприятия. При разработке алгоритма учитывалось, что предложенные принципы создания имитационных моделей в дальнейшем будут реализованы в программном комплексе имитационного моделирования технологических процессов машиностроительных предприятий.

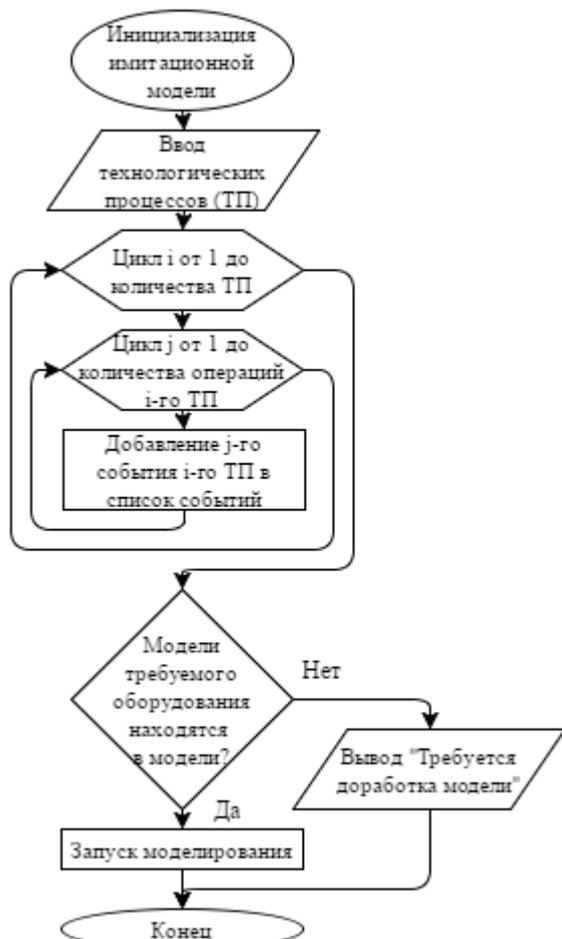


Рис. 2. Алгоритм создания списка событий в момент инициализации имитационной модели

Ввиду того, что предложенный алгоритм необходимо включить в работу программного средства имитационного моделирования на этапе разработки самого программного средства, то применение алгоритма предполагает разработку нового программного комплекса имитационного моделирования или создание моделей на универсальных языках программирования. При создании имитационной модели на универсальном языке программирования выделяют следующие структурные элементы:

- часы модельного времени;
- список событий;
- статистические счетчики;
- программа инициализации;

- синхронизирующая программа;
- программа обработки событий;
- библиотечные программы;
- генератор отчетов;
- основная программа [1].

Необходимо рассмотреть влияние предложенных принципов создания имитационных моделей на структурные элементы. Ввиду того, что список событий формируется на основе событий технологических процессов, то этот список можно заполнить на этапе запуска программы инициализации. Можно определить 2 способа заполнения списка событий: с учетом стохастических переменных и без их учета. Для упрощения первой версии алгоритма предлагается создание списка событий без учета стохастических переменных.

Учитывая, что список событий может быть сформирован в программе инициализации, в программе обработки событий не требуется генерировать время наступления будущих событий. Однако следует отметить, что для повышения адекватности модели в программе обработки событий все же следует оставить возможность генерации случайных событий. Учитывая специфику конкретного машиностроительного предприятия случайные события можно формировать на основе статистики поломок технологического оборудования.

Для реализации алгоритма в программном комплексе имитационного моделирования разработана обобщенная структура функционирования программного средства. При разработке структуры учитывались особенности предложенного подхода формирования событий имитационной модели.

Первый этап разработки имитационной модели по предложенным принципам – создание статической модели производственной системы. В связи с этим в программном комплексе имитационного моделирования требуется наличие объектов, которые могут в полной мере описать существующее технологическое оборудование. При этом следует учитывать особенности оборудования, применяемого на отечественных предприятиях.

Ввиду того, что согласно предложенному принципу имитирующие объекты не связаны между собой, предложена структура перемещение имитации детали по модели. Для этого каждому событию в списке событий сопоставляется объект, имитирующий реальное оборудование. Параллельно с этим у каждого имитирующего объекта создается свой список событий, определяющий поступление деталей. В таком случае каждый объект, имитирующий технологическое

оборудование может быть представлен в виде системы массового обслуживания с одним устройством обслуживания. Очередь поступающих деталей хранится в объекте, имитирующем межоперационное хранение.

Таким образом, добавление нового технологического процесса в имитационную модель будет заключаться в сопоставлении операций исследуемого процесса оборудованию, как показано на рис. 3. При таком подходе возрастает важность точного моделирования всего оборудования, используемого технологическим процессом.

Следует отметить, что в рамках конкретного технологического процесса весь список оборудования в модели может не использоваться.

Предложенные принципы создания имитационных моделей на основе событий технологических процессов предполагается использовать для анализа и оптимизации производственных процессов ПАО «ВАСО». Реализация предложенных принципов позволит разработать программное средство имитационного моделирования, которое будет отвечать современным требованиям российских предприятий.

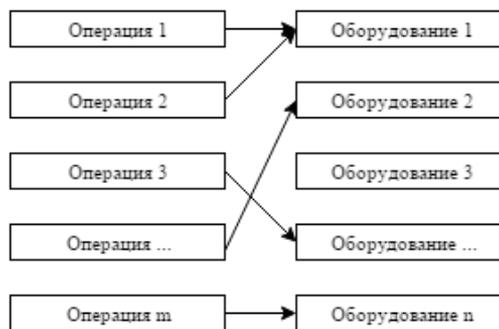


Рис. 3. Сопоставление операций технологического процесса оборудованию

Литература

1. Аверилл М.Л. Имитационное моделирование [Текст] / М.Л. Аверилл, В.Д. Кельтон. - Спб.: Питер, 2004. - 847 с.
2. Гусев К.Ю. Моделирование динамики нелинейных объектов на основе нечёткой нейронной сети [Текст] / К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 3-1. - С. 13-17.
3. Чижов М. И. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter [Текст] / М.И. Чижов, А.В. Бредихин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7. - №. 12-1. - С. 24-26.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF SIMULATION MODEL BASED ON THE EVENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

P.Yu. Gusev, Candidate of Technical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: gusevpvl@gmail.com

Yu.S. Skripchenko, Candidate of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: skripch@yandex.ru

Article suggests the principle of creating simulation models based on the events of technological processes. Primarily we considered simulation method as applied to the study of production process engineering industries. We consider two basic ways to create simulation models using the universal programming languages and using simulation software. A study of the development of simulation models of technological processes in software systems simulation, which showed that existing software have not been adapted for use in the Russian machine-building industries. Based on the findings formulated the basic principles of the creation of simulation models to ensure adaptation to the Russian machine-building enterprises. The first principle of creating simulation models based on accurate simulation of production units, taking into account the scale. Such an approach would solve the layout and planning of the enterprise objectives. The second principle involves creating a list of model based on the technological processes used in the production process. On the basis of the principle of the proposed list of events designed forming algorithm based on process. The effect of the algorithm on the basic elements of a simulation model created on university-greasy programming language. The article also provides a generalized structure of the interaction of objects in the simulation model created by the proposed principles

Key words: simulation, events, processes

References

1. Averill M. Low, Kelton V.D. Simulation. - Spb.: Peter, 2004. - 847 с.
2. Gusev K.Y., Burkovskii V.L. Modelirovanie dinamiki nelinejnyh obektov na osnove nechjotkoj nejronnoj seti [Modeling the dynamics of nonlinear objects based on fuzzy neural network] // Science Journal of Voronezh State Technical University. - 2014. - vol. 10. - № 3-1. - 13-17 p.
3. Chizhov M.I., Bredikhin A.V. Razrabotka podhoda k avtomatizacii tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva v PLM sisteme Teamcenter [Developing approach to the automation of technological preparation of production in the PDM Teamcenter system] // Science Journal of Voronezh State Technical University. - 2011. - vol. 7. - №. 12-1. - 24-26 p.