

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Алгоритм решения задачи оптимального размещения узлов обслуживания в условиях развивающихся мультисервисных сетей

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский..... 4

О перспективных методах работы органов управления в оборонной сфере на основе использования CSRP-технологий

П.А. Коробейников, О.Г. Никитин..... 8

Разработка процедур численной оптимизации объектов со структурно-вариативным управлением на основе использования популяционных алгоритмов

Б.Н. Тишуков, Я.Е. Львович..... 12

Энергетика

Оптимальное календарное планирование работ в системе безаварийного управления АЭС

С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский..... 16

Разработка методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации

Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов..... 21

Компьютерное моделирование статических устройств ограничения токов короткого замыкания в ЭЭС

В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов..... 31

Определение расхода условного топлива в системе последовательно связанных тепловых насосов при энергоэффективном режиме работы

А.В. Исанова, В.И. Лукьяненко..... 36

Реализация программного комплекса прогнозирования уровня регионального энергопотребления

В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков..... 41

Радиотехника и связь

Входной полномасштабный усилитель для КМОП-компараторов и операционных усилителей с низким напряжением питания

В.С. Кононов..... 48

Особенности проектирования устройств цифровой обработки сигналов в базисе ПЛИС серии 5578

А.В. Строгонов, П.С. Городков..... 51

Концепция создания универсальной системы мониторинга функциональных параметров

Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов, Д.В. Шеховцов..... 57

Машиностроение и машиноведение

Время выдержки под давлением при сварке заготовок из титана

М.В. Семенов, В.В. Пешков..... 68

Механизм формирования геометрии переходных участков при комбинированной обработке

О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, В.И. Котуков..... 71

Физика

Структура и свойства медноматричного наноструктурного композиционного материала, полученного методом механического легирования Ю.Р. Копылов, Ю.А. Щетинин, О.В. Горожанкина.....	77
Структура, электрические и оптические свойства пленок $(\text{SnO}_2)_x \cdot (\text{ZnO})_{1-x}$ для $x = 0,3; 0,5$ С.А. Белоусов, Н.Н. Кошелева, А.А. Носов, Т.Г. Меньшикова, С.И. Рембеза...	82
Математическое моделирование технологического процесса автоматизированной выкладки экспериментальных образцов полимерных композиционных материалов А.В. Гаганов, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Я.В. Дарнева.....	86

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.42

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ УЗЛОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩИХСЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский

В статье рассматривается модель оптимального развития мультисервисных сетей, состоящая из модели оптимального размещения включаемых в состав сети узлов обслуживания и модели оптимального выбора комплекса технических средств из множества альтернативных устройств различных производителей. Приводится формальная постановка задачи размещения узлов сети, описаны целевая функция и критерии оптимизации. Для решения данной задачи предлагается использовать модифицированный метод Гомори, использующий для формирования графа решений метод ветвей и границ. Приводится формализованный алгоритм метода, делается вывод, что для ускорения работы алгоритма в данном случае возможно использовать механизм альфа-бета отсечения. Приводится пример практической реализации данного алгоритма для задачи размещения трех узлов. Сделан вывод о возможности применения разработанного метода для ускорения работы алгоритма оптимизации

Ключевые слова: оптимизация, дискретное программирование, мультисервисные сети

Введение

В настоящее время, приобретает большую актуальность задача оптимизации развивающихся структур мультисервисных сетей. Уровень внедрения рассматриваемых сетей постоянно растет, в связи с чем растет ростом конкуренции на рынке предоставления телекоммуникационных услуг населению. Таким образом, решение рассматриваемой задачи направлено на расширение сферы влияния сети, а также привлечение новых пользователей и удержание существующих. В связи с этим, необходимо разработать новые средства оптимизации структур сетей и модернизации их компонентной базы сети в процессе развития [1,2].

Для решения данной проблемы предлагается разделить ее на две основные задачи: задачу оптимального размещения дополнительных узлов, включаемых в сеть, и задачу оптимального выбора комплекса технических средств (КТС) из множества альтернативных устройств различных производителей для узлов, включенных в сеть [2,3]. Рассмотрим детально каждую из них.

Для решения задачи оптимизации КТС в рамках планируемого периода оптимизации предлагается использовать модифицированный метод динамического программирования. Соответствующая оптимизационная модель и алгоритм решения задачи подробно рассмотрены в статьях [4,5,6].

Задача размещения узлов сети

Для формального рассмотрения задачи размещения узлов сети введем следующие обозначения:

$U = \{u_1, \dots, u_I\}$ - множество узлов сети u_i , $i = \overline{1, I}$;

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

P_{ij} - затраты на размещение узла u_i в месте l_j ;

v_j - потенциальная емкость сети на территории l_j , $j = \overline{1, J}$, отражает физическую потребность пользователей в услугах сети;

v_{\min} - минимальное количество задействованной емкости, определяемое в соответствии с планом развития сети.

Задачу оптимального размещения вводимых в сеть узлов можно свести к задаче минимизации суммарных затрат на их размещение [1,3,4,5,6]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} P_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_i \text{ размещается в месте } l_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

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

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

В данном случае ограничение (3) означает, что общее число задействованной емкости (подключенных пользователей) должно превышать минимальный порог задействованной емкости V_{\min} .

Ограничение (4) гарантирует, что один узел может быть размещен только в одном из альтернативных мест [4,5,6].

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

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Для решения задачи размещения узлов предлагается использовать модифицированный метод Гомори [7]. Алгоритм поиска оптимального размещения вводимых в сеть дополнительных узлов можно сформулировать следующим образом:

Шаг 1. Игнорируя условие целочисленности решить задачу минимизации (1), как задачу линейного программирования с помощью симплекс-метода при ограничениях (2), (3), (4).

Шаг 2. Если в множестве оптимальных значений переменных z_{ij} , $i \in \overline{1, I}$, $j \in \overline{1, J}$ существуют переменные $z_{i' j'}$, удовлетворяющие условию нецелочисленности:

$$0 < z_{i' j'} < 1, i' \in \overline{1, I}, j' \in \overline{1, J}, i' \in \overline{1, I}, j' \in \overline{1, J} \quad (5)$$

То перейти к шагу 5 считая текущую задачу за базовую.

Шаг 3. Если не существует рекордов, считать данное значение критерия новым рекордом. Остановить ветвление по данной ветви. Перейти к шагу 8.

Шаг 4. Если существует рекорд, сравнить его с текущим значением критерия. Если значение критерия меньше существующего критерия, считать данное значение критерия новым рекордом. Остановить ветвление по данной ветви. Перейти к шагу 8.

Шаг 5. Производим ветвление по переменной $z_{i' j'}$ $\text{MAX}(z_{i' j'})$, $i' \in \overline{1, I}, j' \in \overline{1, J}$, для этого разбиваем базовую задачу на 2 подзадачи. Так как изначальная задача оптимизации является дискретной, в первой из подзадач к условию базовой задачи добавляем условие $z_{i' j'} = 0$. Во второй подзадаче добавляем условие $z_{i' j'} = 1$.

Шаг 6. Если решения по какой-то из задач нет, остановить дальнейшее ветвление, перейти к шагу 8.

Шаг 7. Решить каждую из подзадач игнорируя условие дискретности и целочисленности симплекс-методом. Для каждой из подзадач перейти к шагу 2.

Шаг 8. Если ветвление по всем веткам алгоритма закончено, считать текущее значение рекорда и соответствующее ему решение оптимальным.

Для ускорения работы предлагается использовать механизм альфа-бета отсечения, основанный на запоминании заведомо неоптимальных значений ограничений переменных

z_{ij} , $i \in \overline{1, I}$, $j \in \overline{1, J}$ и соответствующего значения критерия. Если алгоритм в ходе работы достигает ячейки с уже сохраненными ограничениями, следует остановить дальнейшие вычисления данной ветви.

Пример решения задачи размещения

Рассмотрим практическую реализацию представленного алгоритма на следующем примере. Пусть количество узлов сети $I=3$ и $J=3$.

Потребность пользователей в услугах сети отражена в табл. 1.

Таблица 1

j	1	2	3
v_j	400 ч.	600 ч.	350 ч.

В соответствии с планом развития сети установлен минимальный порог удовлетворяемой потребности $V_{\min} = 800$.

Стоимость размещения узлов в каждом конкретном месте размещения представлена в табл. 2.

Таблица 2

i \ j	1	2	3
1	40,5 т.р.	60,24 т.р.	20,5 т.р.
2	41,3 т.р.	96 т.р.	32 т.р.
3	40,1 т.р.	35,9 т.р.	26,4 т.р.

Запишем постановку задачи линейного программирования, основываясь на задаче минимизации (1) с ограничениях (3) и (4).

$$F(z) = 40,5 z_{11} + 60,24 z_{12} + 20,5 z_{13} + 41,3 z_{21} + 96 z_{22} + 32 z_{23} + 40,1 z_{31} + 35,9 z_{32} + 26,4 z_{33} \quad (6)$$

$$\min$$

$$400 z_{11} + 600 z_{12} + 350 z_{13} + 400 z_{21} + 600 z_{22} + 350 z_{23} + 400 z_{31} + 600 z_{32} + 350 z_{33} = 800 \quad (7)$$

$$z_{11} + z_{12} + z_{13} = 1 \quad (8)$$

$$z_{21} + z_{22} + z_{23} = 1 \quad (9)$$

$$z_{31} + z_{32} + z_{33} = 1 \quad (10)$$

Результат ее решения симплекс-методом представлен в табл. 3. Значения критерия минимизации $F(z) = 47,425$.

Таблица 3

i \ j	1	2	3
1	1	0	1
2	0	0	0
3	0	0,75	0

Здесь $z_{32} = 0,75$ -

нецелочисленно, поэтому необходимо произвести ветвление по этой переменной.

Схема ветвления по переменным, служащая для нахождения решения данной задачи представлена на рисунке.

Как видно из рисунка, дальнейшее ветвление по переменной z_{13} не привело к формированию новых рекордов. Таким образом оптимальным значением критерия для данной задачи будет $F(z) = 80,6$, достигаемом при значениях переменных z_{ij} , $i \in \overline{1, I}, j \in \overline{1, J}$ представленных в табл. 4.

— —

devices from different manufacturers. A formal statement of the problem of placement of nodes is considered, the objective function and optimization criteria are described. To solve this problem are encouraged to use the modified Gomory method, which uses branch and bound method to generate the solution graph. Formalized algorithm method is presented, it is concluded that the mechanism of alpha-beta pruning can be used to speed up the algorithm. An example of practical implementation of this algorithm is solved for the placement problem of three nodes. The conclusion about the possibility of using the method developed to speed up the optimization algorithm is made

Key words: linear programming, discrete programming, multiservice networks

References

1. Elizarov, D.Je., Burkovskij V.L. Optimizacionnye modeli formirovanija struktury razvivajushhihsja mul'tiservisnyh setej informacionnogo obsluzhivanija naselenija [Optimization models of structure formation in developing multi-service networks of information services to the population] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015.-T. 11. - № 4. – P. 20-23.
2. Stepanov, S.N. Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej [Basics of teletraffic in multiservice networks]. – M.: Jeko-Trendz, 2010. - 392 p.
3. Elizarov D.Je., Burkovskij V.L., Voropaev A.P. Obobshhennaja optimizacionnaja model' razvitija mul'tiservisnyh setej [Generalized optimization model of multi-service networks] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015-T. 11, - №3. - P 28-30.
4. Elizarov D.Je., Burkovskij V.L. Model' optimal'nogo razvitija struktury mul'tiservisnyh setej na osnove apparata dinamičeskogo programirovanija [Model of optimal development of the structure of multi-service networks based on dynamic programming] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2016-T. 12, - №1. - P 21-24.
5. Elizarov D.Je., Burkovskij V.L. Modifikacija metoda Bellmana reshenija dinamičeskoy zadachi o rance [Modification of Bellman's method for dynamic knapsack problem] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015.-T. 11. - № 5. – P. 31-33.
6. Elizarov D.Je., Burkovskij V.L. Algoritmizacija reshenija zadachi dinamičeskoy optimizacii struktury mul'tiservisnyh setej [Algorithmic solution of dynamic optimization of multi-network design problems] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015-T. 11, - №6. - P 59-61.
7. Korbut A.A. Finkel'shtejn Ju.Ju.Diskretnoe programmirovanie [Discrete programming].– M.: Nauka, 1969. – 367 p.
8. Elizarov D.Je., Burkovskij V.L. Modeli proektirovanija razvivajushhihsja mul'tiservisnyh setej [Models of developing the design of multiservice networks] // Perspektivnye issledovanija i razrabotki v oblasti informacionnyh tehnologij. - 2014. – P. 4.
9. Burkovskij, V. L. Matvienko I. M., Burkovskij A. V. Analiz razvivajushhihsja informacionnyh sistem na osnove apparata modelirovanija i optimizacii [Analysis of developing information systems based on modeling and optimization of the machine]: monografija. – Voronezh: GOU VPO VGTU, 2009. – 136 p.

О ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДАХ РАБОТЫ ОРГАНОВ УПРАВЛЕНИЯ В ОБОРОННОЙ СФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CSRP-ТЕХНОЛОГИЙ

П.А. Коробейников, О.Г. Никитин

Разработаны предложения по совершенствованию методов работы должностных лиц органов управления в оборонной сфере путем внедрения в их работу интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Рассмотрены принципы интеллектуальности систем поддержки принятия решений, позволяющие говорить о применении нового метода работы должностных лиц: с помощью «виртуального штаба», построенного на основе стандарта функционирования GSRP-систем. Показано, что такая СППР является компонентом подсистемы управления, в которой одна часть решений принимается и реализуется должностными лицами в «ручном» режиме, а другая часть решений принимается и реализуется техническими автоматами с помощью технологии «отложенных решений», заключающейся в том, что для каждой типовой ситуации заблаговременно обосновывается, формируется и запоминается в библиотеке отложенных решений оптимальное или близкое к нему решение. В дальнейшем при сравнении между собой текущей ситуации с хранящимися в базе знаний типовыми ситуациями соответствующее рациональное решение выбирается автоматически. Применение таких СППР позволит изменить подход к организации работы органов управления, оптимизировать их численность с одновременным повышением оперативности и обоснованности принимаемых решений

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, методы автоматизации процессов управления, должностные лица органов управления, база знаний, «виртуальный штаб»

Введение

В настоящее время возможности современных информационных технологий возросли настолько, что позволяют затронуть такую область управления, как процесс принятия решения, характеризующийся множеством структурированных и слабоструктурированных задач, отсутствием жестких алгоритмов их решения, необходимостью интеграции на единой концептуальной основе технологий сбора и обработки информации с последующим представлением должностному лицу возможных вариантов решений. Перечисленные выше задачи эффективно решаются с помощью систем поддержки принятия решений (СППР), обеспечивающих, в том числе, и интеллектуальную составляющую управления подчиненными силами и средствами.

Целью данной статьи является разработка предложений по совершенствованию методов работы должностных лиц органов управления в оборонной сфере путем внедрения в их работу интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Основные понятия

Прежде всего, уточним базовые понятия: «система поддержки принятия решений (СППР) военного назначения» и «интеллектуальная СППР». С учетом определений [1,2], в общем виде СППР военного назначения целесообразно определить как систему, позволяющую должностным лицам органов управления использовать знания, опыт, объективные и субъективные модели, данные для анализа и решения слабоструктурированных проблем в процессах подготовки решений по применению войск (сил).

Учитывая, что в настоящее время практически любая задача в части управления войсками (сила-

ми) является сложной, обладающей множеством взаимосвязанных количественных и качественных параметров (слабоструктурированные задачи), то такие системы являются практически обязательным инструментом должностных лиц при управлении войсками.

С практической точки зрения системой поддержки принятия решений называется информационно-вычислительный комплекс на базе ПЭВМ, способный решать все задачи не хуже, чем решает их эксперт соответствующей предметной области (должностное лицо органа управления). И при этом СППР может либо в автоматическом режиме заменять эксперта, либо в том же автоматическом режиме помогать эксперту в формировании решения [3].

Под *интеллектуальностью* системы поддержки принятия решений подразумевается ее способность работать с базой внешних событий или ситуаций с целью привлечения неких специальных знаний, позволяющих уточнить предложенную задачу и наметить пути ее решения. Известны следующие принципы интеллектуальности систем [3]:

Первый принцип. Наличие тесного информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром с использованием специально организованных информационных каналов связи.

Второй принцип. Принципиальная открытость систем с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения.

Третий принцип. Наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире.

Четвертый принцип. Наличие многоуровневой иерархической структуры, построенной в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения ранга иерархии в системе (и наоборот).

Пятый принцип. Сохраняемость функционирования (возможно, с некоторой потерей качества или эффективности) при разрыве связей или потере

Коробейников Павел Андреевич – ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», адъюнкт, e-mail: panich07@mail.ru
Никитин Олег Геннадьевич - ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, e-mail: nikson601@yandex.ru

управляющих воздействий от высших уровней иерархии управляющей структуры.

Описание метода работы

Использование СППР, удовлетворяющей перечисленным выше принципам построения, позволяет возложить на нее множество функций должностных лиц, что, в свою очередь позволяет говорить о применении *нового метода работы должностных лиц органа управления*: с помощью «виртуального штаба», нацеленного на персональную поддержку лица, принимающего решение (ЛПР), или обеспечение групповой расчетно-аналитической деятельности [4].

Очевидно, что основными составляющими реализации данного метода являются сбор информации, ее анализ и обработка, а также принятие решения. Реализовать функцию сбора с учетом необходимости формирования надежного информационного фундамента для построения СППР можно только в виде подсистемы мониторинга обстановки.

На этот первичный фундамент будут опираться подсистемы обработки и агрегирования информации, которые, в свою очередь, послужат основой для запуска расчетных и моделирующих компонентов СППР. На верхнем уровне системы станет возможным применение блоков формирования и ранжирования альтернатив поведения, средств формирования пояснений к альтернативам [4].

Для выполнения указанных функций СППР военного назначения может быть построена на основе известного стандарта функционирования корпоративных информационных систем (так называемых *CSRP*-систем: *Customer Synchronized Resource Planning* - планирование ресурсов, синхронизированное с пользователем (англ.) - по уровням: «ЛПР» - «менеджеры» - «технологический персонал») [4].

С учетом данной концепции место элементов СППР военного назначения при автоматизированном управлении войсками (силами) показано на рис. 1.



Рис. 1. Место элементов СППР военного назначения при автоматизированном управлении войсками

Очевидно, что реализация такой СППР будет сопряжена с технологическими и организационными трудностями, но в результате ее внедрения будет получен целый ряд существенных преимуществ:

сокращение объема рутинной работы, что позволяет сократить длительность цикла принятия решения и/или предоставить больше времени на аналитическую деятельность должностных лиц;

автоматизация обмена формализованной информацией, что сократит время циркуляции информации в сети, уменьшит дублирование работ, снизит количество ошибок ввода и обработки информации;

автоматический обмен информацией, что обеспечит полноту знаний о рассматриваемых проблемах, повышая в конечном итоге обоснованность принимаемых ими решений;

принятие решений не на субъективных оценках должностных лиц, а путем формализованной обработки результатов решения задач, моделирования и использования базы знаний, что значительно повышает объективность принимаемых решений.

Более того, в результате внедрения в деятельность органов управления «виртуального штаба» не только возрастет информационная осведомленность должностных лиц и обоснованность принимаемых органами управления решений, но и сократится длительность цикла управления за счет исключения промежуточных этапов, что меняет алгоритм его функционирования в целом [4].

СППР является компонентом подсистемы управления, в которой одна часть решений принимается и реализуется должностными лицами в так называемом «ручном» режиме, а другая часть решений принимается и реализуется техническими автоматами. Идущее сейчас и ожидаемое в перспективе изменение темпов ведения боевых действий таково, что с течением времени удельный вес решений, которые должны приниматься и реализовываться автоматами, будет возрастать. А это означает, что для принятия и реализации решений автоматами необходимо использовать технологию и методы ситуационного управления с использованием такой категории, как «отложенное» решение [5]. Для каждой типовой ситуации заблаговременно обосновывается, формируется и обследуется (оценивается) оптимальное или близкое к нему решение и запоминается в библиотеке отложенных решений СППР. Когда в динамике боевых действий времени на принятие решения в реальной сложившейся ситуации недостаточно, виртуальный штаб должен в автоматическом режиме найти ближайшую типовую ситуацию и для нее автоматически ввести в действие отложенное решение. Т.е., проектируемая СППР должна «уметь» сравнивать между собой текущую ситуацию с хранящимися в базе знаний типовыми ситуациями.

Следует подчеркнуть, что только во взаимодействии с потребителем разработчик СППР эвристически определяет перечень и характер решений,

которые должны приниматься при подготовке и ведении боевых действий. Для каждого такого решения разработчик синтезирует алгоритм обоснования и формирования решения, а также перечень исходных данных, манипулируя которыми можно прийти к этому решению.

Разработчик формирует полное и избыточное множество исходных данных и вводит его в базу данных СППР. В базе данных содержатся условно постоянные и переменные данные. В ходе применения СППР пользователь непрерывно обновляет в базе данных состав переменных данных, а система поддержки принятия решений в автоматическом режиме в каждый момент времени формирует на основе имеющихся в базе данных описание текущей ситуации (*мгновенной обстановки для принятия решений* - *МОПР*). Полное множество синтезированных алгоритмов принятия решений разработчик вводит в СППР на правах библиотеки алгоритмов, которая рассматривается как первый компонент базы знаний. Используя базу данных и библиотеку алгоритмов, СППР в автоматическом режиме обосновывает и формирует полное множество решений для всех ожидаемых в ходе боя типовых ситуаций, которые в совокупности образуют второй компонент базы знаний библиотеку типовых ситуаций и отложенных решений. В автоматическом режиме СППР сравнивает описание МОПР с описаниями типовых ситуаций и выбирает ближайшую к сложившейся в данный момент МОПР типовую ситуацию, а соответствующее отложенное решение предлагает пользователю для утверждения или корректировки. В том случае, если СППР не находит ближайшей к МОПР типовой ситуации, она предлагает должностному лицу принять решение самостоятельно. С учетом рассмотренной оригинальной концепции «виртуального штаба», состав и структура СППР могут быть представлены в виде структурной схемы, включающей шесть основных блоков [5]. На рис. 2 пунктирными линиями отображены взаимосвязи блоков СППР при настройке системы на предметную область и конкретный театр военных действий, а сплошными — при функционировании системы.

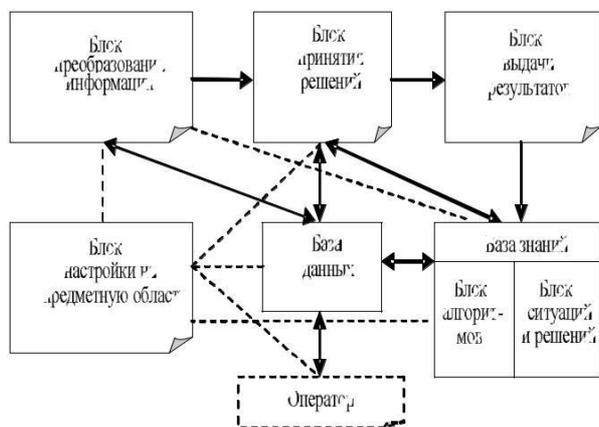


Рис. 2. Состав и структура системы поддержки принятия решений

Блок настройки на предметную область предназначен для выполнения следующих функций:

построение в интерактивном режиме с пользователем функций принадлежности, описывающих нечеткие переменные признаков радиоэлектронных объектов систем информационного обеспечения исполнительных элементов боевого порядка противника;

формирование типовых ситуаций и соответствующих им отложенных решений с дальнейшим их сохранением в базе знаний;

формирование библиотеки алгоритмов принятия решений СППР военного руководителя;

заполнение базы данных по конкретному противнику и своим войскам.

Блок преобразования информации предназначен для преобразования типовых ситуаций и МОПР путем проецирования количественных и качественных значений описывающих их признаков на соответствующие им функции принадлежности, построенные в блоке настройки на предметную область.

База знаний СППР состоит из двух компонентов: библиотеки алгоритмов принятия решений, а также библиотеки ситуаций и решений, в которой хранятся формализованные описания всех типовых ситуаций и формализованные представления отложенных решений для каждой типовой ситуации.

Выводы

Одним из новых методов работы должностных лиц органов управления в оборонной сфере является управление подчиненными войсками (силами) с помощью «виртуального штаба», в основе которого лежит интеллектуальная СППР, построенная на основе стандарта *CSRP*-систем: Одним из вариантов реализации такой СППР является система, базирующаяся на технологии формирования и последующего использования «отложенных» решений.

Применение таких СППР позволит изменить подход к организации работы органов управления, оптимизировать их численность с одновременным повышением оперативности и обоснованности принимаемых решений.

Литература

1. Ларичев, О.И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы развития [Текст] / О.И. Ларичев, А.Б. Петровский // Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика. – 1987. – Т.21. – С. 131–164.
2. Довженко, В.Н. Поддержка принятия решений при управлении войсками и оружием [Текст] / В.Н. Довженко, В.Н. Завгородний // Военная мысль. – 2014. – № 6. – С. 19–25.
3. Информационные технологии в системе управления ВМФ (теория и практика, состояние и перспективы развития) [Текст] / В.Ф. Шпак, Н.Ф. Директоров, В.И. Мирошников, С.Н. Навойцев, В.Н. Наумов,

А.В.Серегин, Ю.И. Синещук, О.М. Туровский; под общ. ред. В.В. Авдошина. – СПб.: «Элмор», 2005. – 832 с.

4. Выпасняк, В.И. Система поддержки принятия решений как «виртуальный штаб» [Текст] / В.И. Выпасняк, А.М. Гуральник, О.В.Тиханычев // Военная мысль. – 2015. – № 2. – С. 23–29.

5. Донсков, Ю.Е. Роль интеллектуальных систем поддержки принятия решений при управлении радио-

электронной борьбой в общевойсковых тактических формированиях [Текст] / Ю.Е. Донсков, О.Г. Никитин, П.Н. Беседин // Военная мысль. – 2015 г. - № 10. – С.33-41.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

ON ADVANCED TYPES OF CONTROL OPERATION IN THE DEFENCE SPHERE BASED ON EMPLOYMENT OF CSRP-TECHNOLOGIES

P.A. Korobeynikov, Adjunct of the Air Forces Education and Research Centre 'Air Forces Academy', Voronezh, Russian Federation, e-mail: panich07@mail.ru

O.G. Nikitin, Candidate of Technical Sciences, Doctoral Candidate of the Air Forces Education and Research Centre 'Air Forces Academy', Voronezh, Russian Federation, e-mail: nikson601@yandex.ru

Developed proposals for improving the working methods of officials of management bodies in the defense sector through the introduction in their work of intellectual systems of support of decision-making. Consideration; the principles of intellectual systems of decision support, allowing to speak about the application of the new method of work of the officials - with the help of "virtual headquarters" built based on the standard functioning of GSRP systems. It is shown that the DSS is a component of the management subsystem, in which one of the decisions taken and implemented by the officials in "manual" mode, and the other part of the decisions taken and implemented by technical machines using the technology of "delayed decisions", namely that, for each sample of the situation in advance is justified, is formed and stored in the library pending solutions optimal, or close to it. Further, on comparison between the current situation stored in the knowledge base of typical situations corresponding rational solution is automatically selected. The use of such DSS will change the approach to organization of work of the management bodies, to optimize their number with a simultaneous increase in the efficiency and validity of decisions

Key words: decision support systems, automation techniques control procedures, control officials, knowledge base, virtual headquarters

References

1. Larichev, O.I. Sistemy podderzhki prinjatija reshenij. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija [Decision Support System. Current status and prospects]. Itogi nauki i tehniki. Ser. Tehnicheskaja kibernetika. – 1987. – T.21. – P. 131–164.
2. Dovzhenko, V.N., Zavgorodnij V.N. Podderzhka prinjatija reshenij pri upravlenii vojskami i oruzhiem [Support for decision-making within control of troops (forces)]. Voennaja mysl'. – 2014. – № 6. – P. 19–25.
3. Shpak, V.F. Informacionnye tehnologii v sisteme upravlenija VMF (teoriya i praktika, sostojanie i perspektivy razvitija [Information technology in the Navy control system (theory and practice, current status and prospects)]. – SPb.: «Jelmor», 2005. – 832 p.
4. Vypasnjak V.I., Gural'nik A.M., Tihanychev O.V. Sistema podderzhki prinjatija reshenij kak «virtual'nyj shtab» [Decision Support Systems as a «virtual headquarters»]. Voennaja mysl'. – 2015. – № 2. – P. 23–29.
5. Donskov, Ju.E., Nikitin O.G., Besedin P.N. Rol' intellektual'nyh sistem podderzhki prinjatija reshenij pri upravlenii radiojelektronnoj bor'boj v obshhevojskovyh takticheskikh formirovanijah [The role of intelligent decision-making support systems during control of electronic warfare at combined-arms tactical formations]. Voennaja mysl'. – 2015. – № 10. – P.33-41.

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУР ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ СО СТРУКТУРНО-ВАРИАТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

Б.Н. Тишуков, Я.Е. Львович

В представленной статье рассматривается описание объектов со структурновариативной формой управления, их основные особенности. Определяются цель и задачи оптимизации объектов данного типа, рассматриваются методики их решения. Предлагается описательная постановка задачи структурной оптимизации с элементами вариативности, строится и описывается оптимизационная модель объектов рассматриваемого типа. В качестве математического аппарата для решения описанного класса задач рассматривается использование популяционных алгоритмов (алгоритм поведения обезьян), изучаются теоретические основы построения и принципы их функционирования, обосновывается необходимость их применения. Разрабатываются процедуры численной оптимизации объектов со структурновариативной формой управления, в основе которых лежит аппарат популяционных алгоритмов. По полученным результатам разработки делаются выводы об эффективности предложенной методики решения задач структурной оптимизации с использованием вариативных компонентов

Ключевые слова: объект со структурновариативной формой управления, оптимизационная модель, процедура численной оптимизации, популяционный алгоритм

Введение

В работе рассматриваются основные характеристики объектов со структурновариативным управлением, особенности организации оптимизационных процедур для данного типа объектов. В качестве численных методов оптимизации объектов со структурновариативным управлением предлагается использовать популяционные алгоритмы для поиска экстремального значения (максимума) целевой функции с учетом заданных ограничений.

1. Понятие объектов со структурновариативной формой управления

В решаемом классе задач в качестве исследуемого объекта выступают объекты со структурновариативной формой управления.

Под структурным управлением (структурной оптимизацией) будем понимать поиск такой структуры объекта исследования, которая будет являться наиболее рациональной и эффективной в рамках существующих условий.

В ходе решения задач структурной оптимизации происходит поиск альтернативных структур исследуемого объекта, при этом чем больше их количество, тем вероятность подбора оптимальной (рациональной) структуры выше.

Под вариативностью решений для объектов будем понимать такое воздействие на объекты, целью которого является разработка, обобщение и реализация многообразия предлагаемых решений (вариантов) для достижения необходимого результата (оптимального или рационального состояния).

Одной из эффективных форм осуществления вариативности процесса управления объектами является проектирование.

Исходя из этого, сформулируем определение объекта со структурновариативной формой управления.

Объектом со структурновариативной формой управления будем называть такие объекты, решение задач управления (оптимизации) которыми требует поиск рациональной (оптимальной) их структуры за счет перебора возможных вариантов ее изменения с учетом заданных ограничивающих факторов и параметров.

2. Постановка задачи оптимизации объектов со структурновариативной формой управления

Исходя из описания и определения, сформулированного в п.1 данной статьи, рассмотрим постановку задачи оптимизации объектов исследуемого типа.

Как уже было указано, пусть имеется некоторый объект, для которого необходимо найти оптимальную структуру. При этом существует ряд ограничений и известен вид искомого решения.

Очевидно, что оптимальность структуры объекта будет определяться по какому-либо из критериев, в наибольшей степени влияющих на нее. Именно этот критерий и будет являться критерием оптимальности структуры объекта и будет выражаться целевой функцией в математической модели задачи (1).

Тишуков Борис Николаевич – ВГТУ, аспирант,

тел. 8 (473) 243-77-04

Львович Яков Евсеевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-77-04

$$\begin{aligned}
& f(x_k, x_l, \dots, x_m) \text{ max,} \\
& x_k \in [x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^K], \quad x_k \in K', \\
& x_l \in [x_l^1, x_l^2, \dots, x_l^L], \quad x_l \in L', \\
& \dots \\
& x_m \in [x_m^1, x_m^2, \dots, x_m^M], \quad x_m \in M', \\
& x_k \in [0, x_l \in [0, \dots, x_m \in [0,
\end{aligned}
\tag{1}$$

Из (1) имеем, что целевая функция, выраженная в виде $f(x_k, x_l, \dots, x_m)$, будет отображать зависимость критерия оптимальности от основных параметров объекта.

Ограничения в построенной оптимизационной модели будут задаваться в дискретном виде. При этом каждое из значений параметров может принимать значения строго больше 0 и из соответствующего конечного множества (множества вариантов решений).

Решение поставленной задачи будем искать в виде вектора X (2):

$$X = \begin{pmatrix} x_k^{n1} \\ x^{nz} \\ \dots \\ x_m^{nN} \end{pmatrix}
\tag{2}$$

Процесс решения поставленной задачи классическими оптимизационными методами является трудоемким, а в некоторых случаях и невозможным. Это обусловлено рядом факторов: нелинейность, многоэкстремальность, высокая вычислительная сложность оптимизируемой функции, большая размерность области поиска решений и др.

3. Теоретические основы популяционных алгоритмов решения задач оптимизации

Одним из способов, позволяющих решать описанный класс задач, является использование для этого популяционных алгоритмов оптимизации.

Рассмотрим методику популяционного алгоритма в обобщенном виде:

1⁰. Инициализация популяции (в заданной области поиска решений создаем произвольным образом несколько начальных приближений к искомому решению поставленной задачи). Этот этап можно назвать как создание популяции агентов.

2⁰. Миграция агентов популяции (с помощью определенного набора миграционных операторов распределяем агентов популяции так, чтобы в конечном счете подобраться к искомому оптимальному значению заданной функции).

3⁰. Завершающий этап (Проверка условий окончания итерационных процедур алгоритма. Если они достигнуты – завершаем процедуру алгоритма и лучшее положение агентов считаем в качестве приближенного решения поставленной задачи. В противном случае возвращаемся к шагу 2).

Для дальнейшей работы с популяционными алгоритмами введем следующие обозначения:

- $f(X)$ – Заданная целевая функция (ц.ф.);
- $f(X^{opt})$ – значение ц.ф., соответствующее оптимальному значению;
- S_0 – начальная популяция;
- S – популяция, имеющаяся на данный момент; S' – дальнейшие популяции;
- s^{best} – лучший агент популяции;
- p^{max} – предельное значение количества итерационных процедур (популяций);
- p – номер текущего поколения (итерации);
- X_j – текущий вектор параметров оптимизационной модели;
- X_{j+1} – вектор параметров оптимизационной модели на следующем шаге итерационного процесса;
- X^{opt} – лучшее положение агента за весь период итерационного процесса;
- (X) – функция приспособленности агента (фитнесс-функция);
- $best$ – оптимальное значение фитнес-функции.

Считаем, что целевая функция поставленной оптимизационной задачи достигает максимального (минимального) значения, при этом соответствующая ей «фитнесс-функция» также должна достигать максимального (минимального) значения.

Для процесса формирования начальной популяции в большинстве случаев распределяют по случайному принципу. При этом распределение должно быть равномерным по всей области поиска.

Условием окончания поиска в популяционных алгоритмах является достижение предельного значения (верхней границы) количества поколений заданной популяции или на протяжении нескольких итерационных шагов (их количество оговаривается в начальных условиях работы алгоритма) значение целевой функции остается неизменным.

4. Популяционный алгоритм, основанный на поведении обезьян

Одним из эффективных алгоритмов рассматриваемого класса для решения задач представленного типа является алгоритм, основанный на поведении обезьян.

Данный алгоритм основан на поведении обезьян в процессе их миграции по горам с целью поиска пищи. Полагается, что обезьяны считают «чем выше гора, тем больше пищи на ее вершине».

Из начального положения каждая обезьяна, входящая в сформированную популяцию, перемещается по склону горы, пока не достигнет горной вершины. После серии таких подъемов обезьяна совершает перемещение на соседние горы, после чего процедура повторяется (локальный способ).

В случае, если на локальном этапе все окрестности начального положения обезьяны исследованы, но поставленная цель при этом не достигнута, происходит переход к глобальному способу.

Глобальный способ заключается в более длинном перемещении обезьяны в новую область исследования.

Описанная процедура будет иметь количество итераций, которое задает пользователь перед началом работы алгоритма.

Оптимальным решением задачи при использовании описанного алгоритма будет являться самая высокая из просмотренных вершин, исследованных выбранной популяцией.

Пусть имеется популяция S , состоящая из i агентов. Тогда локальный способ будет иметь следующую формулировку:

1. Исходя из начального (текущего) положения агента X_i определяем его возможное новое положение X'_i в виде (3):

$$x'_{i,j} = W((x_{i,j} - b); (x_{i,j} + b)), i = 1:|S|, j = 1:|X|, \quad (3)$$

где b – максимально возможное значение длины прыжка агента в заданном направлении, $b > 0$.

2. Если точка X'_i является допустимой, при этом $(X'_i) = (X_i)$, тогда присваиваем X_i значение X'_i . При этом для агента i заданной популяции S завершаем процедуру локальных прыжков (локальный способ). В противном случае возвращаемся к 1 шагу локального способа заданное кол-во раз.

Далее рассмотрим глобальный способ (глобальные прыжки):

1. По равномерному закону распределения выбираем случайное вещественное число из интервала $[\min; \max]$. Это значение будет характеризовать значение величины глобального прыжка (4):

$$= W(\min; \max). \quad (4)$$

Значения \min и \max могут иметь разные знаки, поэтому значение может быть как отрицательным, так и положительным.

2. На следующем этапе глобального способа осуществляем поиск возможного нового положения X'_i для агента s_i в виде (5):

$$x_{i,j}^c = x_{i,j} + (x_j^c - x_{i,j}), i = 1:|S|, j = 1:|X|, \quad (5)$$

где x_j^c – текущее положение центра тяжести агентов заданной популяции по j -ому координатному направлению (6), при этом:

$$x_{i,j}^c = \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} x_{i,j}. \quad (6)$$

3. В случае, если положение X'_i является допустимым по заданным условиям, то присваиваем X_i значение X'_i . При этом для агента i заданной популяции S завершаем процедуру глобальных прыжков. В противном случае возвращаемся к 1 шагу глобального способа.

В связи с тем, что с помощью рассмотренного оптимальное решение может быть получено на промежуточном итерационном шаге, то необходи-

мо сохранять найденные значения на всех итерационных шагах.

5. Особенности применения популяционного алгоритма, основанного на поведении обезьян для решения задач оптимизации объектов со структурновариативным управлением

Рассмотрим особенности применения алгоритма, описанного в п.3-4 данной статьи для решения задачи (1) – (2).

Основными особенностями будет являться наличие возможных значений переменных, входящих в вектор искомого решения X , представленного в виде (2).

Также для каждого из параметров (2) задано конкретное значение шага при «локальных прыжках» b_m .

Сам алгоритм в модифицированном виде под класс решаемых задач можно представить в следующем виде:

1⁰. Задаем m начальных популяций с соответствующими значениями $b = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$. При этом значение шагов рассчитывается с учетом возможных решений.

2⁰. В соответствии с установленными значениями шагов и начальными популяциями совершаем локальные прыжки. Для каждого i -го шага вычисляем значение фитнес-функции.

3⁰. Проводим сравнение значений фитнес-функций для i -го и $i-1$ итерационных шагов. После вычислений проводим проверку условий: $i > i-1$.

4⁰. В случае выполнения условия полученное на i -ом шаге решение запоминаем как оптимальное и продолжаем итерационную процедуру, переместившись в точку на величину шаг b .

5⁰. После того, как все возможные точки пройдены, проводим сравнение результатов, полученных на каждом из локальных шагов и выбираем из них наилучшее.

Заключение

Таким образом, в ходе написания статьи была поставлена задача оптимизации объектов со структурновариативным управлением, подобраны алгоритмы, позволяющие наилучшим образом решить ее и описана модификация одного из популяционных алгоритмов, позволяющих находить оптимальное решение рассматриваемого класса задач.

Литература

1. Карпенко, А.П. Популяционные алгоритмы оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов [Текст] / А.П. Карпенко // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2012. - № 7. – 30 с.
2. Львович, Я.Е. Принятие решений в экспертно-виртуальной среде [Текст] : монография / Я.Е. Львович Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2010. – 140 с.

DESIGN OF PROCEDURES FOR NUMERICAL OPTIMIZATION OF OBJECTS WITH STRUCTURALLY VARIABLE CONTROL BASED ON THE USE OF POPULATION-BASED ALGORITHMS

B.N. Tishykov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: tishykov_boris@mail.ru

Ya.E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sapris@vorstu.ru

In the submitted article the description of objects with the structurally variable form of government, their main features is considered. The purpose and problems of optimization of objects of this type are defined, techniques of their decision are considered. The descriptive problem definition of structural optimization with variability elements is offered, the optimizing model of objects of the considered type is under construction and described. As the mathematical device for the solution of the described class of tasks use of population algorithms (algorithm of behavior of monkeys) is considered, theoretical bases of construction and the principles of their functioning are studied, need of their application is proved. Procedures of numerical optimization of objects with the structurally variable form of government which cornerstone the device of population algorithms is are developed. By the received results of development conclusions about efficiency of the offered technique of the solution of problems of structural optimization with use of variable components are drawn

Key words: object with structuralization form of management, optimization model, a numerical optimization procedure, a population-based algorithm

References

1. Karpenko A.P. Populjacionnye algoritmy optimizacii. Obzor novyh i maloizvestnyh algoritmov [Population algorithms of optimization. Review of new and little-known algorithms.] Application to academic periodical "Information Technologies" N 7/2012. – 30p.
2. Lvovich Ya.E. Prinjatie reshenij v jekspertno-virtual'noj srede : monografija [Decision-making in the expert and virtual environment: monography.] Voronezh: IPTs "Scientific Book", 2010. – 140p.

ОПТИМАЛЬНОЕ КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ В СИСТЕМЕ БЕЗАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭС

С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский

В статье рассматривается возможность оптимального календарного планирования ремонтно-профилактических работ в комплексе мер по созданию системы безаварийного управления экстремальными производствами. В качестве основных параметров рассмотрены показатель запаса времени, который отражает временную удалённость объекта до предполагаемого отказа, степень близости объекта к аварийной ситуации, определяемая системой прогнозирования, степень влияния аварии отдельного объекта на функционирование всей системы в целом, определяемая экспертным путём. Математическая постановка задачи сведена к поиску экстремума функции цели: степени аварийности обслуживаемой системы. Решение поставленной задачи выполнено методом неопределённых множителей Лагранжа. Предложен алгоритм минимизации степени аварийности системы. Рассмотрен пример реализации найденного решения для четырех классов безопасности оборудования АЭС. Из анализа графиков степени близости к аварийной ситуации, количества используемых на оборудовании ресурсов обслуживания и величины временного запаса сделаны выводы о значимости оборудования всех классов безопасности

Ключевые слова: календарное планирование, алгоритмизация, прогнозирование, безаварийное управление

В настоящее время в промышленность, наряду с традиционной системой технического обслуживания, интенсивно внедряются системы прогнозирования аварийных ситуаций, предусматривающие получение целого спектра параметров, описывающих реальное динамическое состояние каждого объекта обслуживания в производственном процессе.

В связи с этим появляется принципиальная возможность разработки и реализации алгоритма оптимального календарного планирования работ (ОКПР) по упреждению аварийных ситуаций, составляющего, в совокупности с системой прогнозирования единый комплекс безаварийного управления производством [1, 2].

В основу подобного алгоритма положена возможность параллельного обслуживания объектов и возможность совершать ремонтные работы над отдельной частью устройства. Общее содержание процедур алгоритма можно представить в следующем порядке:

а) выполняется поиск экстремума (минимума) критерия степени аварийности системы по переменным, определяющим состояние отдельных элементов оборудования;

б) согласно полученному решению на объекты направляется соответствующее количество ресурсов для осуществления ремонта или обслуживания;

в) при изменении состояния системы поиск оптимального решения производится заново в реальном масштабе времени.

Основные задачи, возникающие при построении этого алгоритма:

формирование вида интегрального критерия системы, который описывает ее общую

работоспособность и степень близости к аварийной ситуации;

выбор метода нахождения экстремума этого критерия.

В числе входных величин алгоритма должны присутствовать параметры планового обслуживания оборудования, показатели непосредственного мониторинга системы объектов обслуживания, экспертные оценки влияния неправильного функционирования элемента на нормальное функционирование всей системы, сложность и длительность ремонта конкретных единиц оборудования.

Формы представления этих параметров в алгоритме планирования изложены в работе [3].

Это, во-первых, показатель запаса времени S , который отражает временную удалённость объекта до предполагаемого отказа:

$$S = 1 - \frac{t_{сл.отк.}}{t_{тек.} + t_{сл.отк.}} \cdot e^{(t_{тек.} - t_{сл.отк.}) / t_{сл.отк.}} \cdot t_{сл.отк.} \quad (1)$$

где $t_{тек.}$ - текущий момент времени (время момента расчетов); - экспериментальный параметр, определяющий влияние задержки в

плановом обслуживании на функцию цели; $t_{сл.отк.}$ - расчетное время следующего отказа:

$$t_{сл.отк.} = t_{обсл.} + t_{сл.отк.} \cdot t_{сл.отк.} \quad (2)$$

$t_{обсл.}$ - дата последнего обслуживания; $t_{сл.отк.}$ - средняя наработка на отказ объекта обслуживания.

Во-вторых, количественной мерой угрозы возникновения аварии на объекте принята степень близости объекта к аварийной ситуации A , изменяющаяся в пределах от 0 до 1. Нулевое

Ткалич Сергей Андреевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: sergeytkalich@mail.ru
Бурковский Виктор Леонидович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: Bvl@vorstu.ru

значение свидетельствует об отсутствии предпосылок аварии, а единичное – о непосредственной близости аварии. Этот показатель определяется с помощью систем прогнозирования, принцип построения и особенности функционирования которых изложены в работах [4, 5].

В-третьих, степень влияния аварии на отдельном объекте на функционирование всей системы в целом определяется экспертным путём и уточняется в ходе тестирования разрабатываемого алгоритма для каждой конкретной обслуживаемой системы. Количественным показателем этого параметра выбрана величина I_i , которая в зависимости от занимаемого объектом места в производственной цепи принимает значения из интервала от 0 до 1. Таким образом I_i – есть нормированная экспертная оценка важности нормального функционирования объекта для всей системы в целом. Нулевое значение указывает на отсутствие влияния отказа объекта на нормальное функционирование системы. Единичное же значение определяет самый важный элемент в ней.

Кроме того, в обязательном порядке необходимо учесть сложность проведения ремонтных работ. Сложность проведения ремонтных работ является функцией структурных свойств конкретного объекта обслуживания и включает в себя большой спектр показателей, уникальных для каждого объекта.

Сложность работ характеризуется, по меньшей мере, следующими показателями: среднее время

обслуживания объекта $t_{o.c.p.}$ при участии нормативного количества обслуживающих единиц;

среднее время ремонта объекта $t_{p.c.p.}$ при участии нормативного количества обслуживающих единиц; нормативное количество M ресурсов обслуживания, необходимое для успешного проведения работ на объекте.

Следует отметить, что при изменении количества обслуживающих единиц на объекте изменяются сроки завершения ремонтных работ. Если в работе используется нормативное количество ресурсов, то обслуживание протекает полностью согласно плану. В других случаях длительность

обслуживания отличается от $t_{p.c.p.}$. Это определяется показателем $I_i(M, m_i)$, определяющим степень изменения времени обслуживания (ремонта) в зависимости от (M, m_i) , где m_i – непосредственное количество ресурсов, находящихся в работе над объектом; l – константа.

Математическая постановка задачи сводится к поиску экстремума функции цели: степени аварийности обслуживаемой системы.

По своей сути искомая функция цели есть совокупность аналогичных критериев для каждого объекта обслуживания (элемента производственной системы) и их взаимосвязи.

Определим функцию цели U следующим образом:

$$U(S_i, a_i) = \prod_{i=1}^k (A_i - a_i) I_i f_i(m_i), \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, k$; k – количество объектов обслуживания в системе; f_i – функция влияния времени ремонта на общий критерий:

$$f_i(m_i) = \frac{t_{p.c.p.i} (M_i - m_i)}{t_{p.max}} \quad (4)$$

$t_{p.max}$ – максимальное время ремонта среди всего оборудования, M_i – нормативное количество единиц обслуживания, требуемое для ремонта i -го объекта; m_i – количество единиц обслуживания (ресурсов), направляемое на ремонт i -го объекта; S_i и a_i – переменные, показывающие на сколько должны измениться параметры S_i и A_i i -ого объекта после его обслуживания в соответствии с принятым распределением ресурсов.

Очевидно, что процесс обслуживания или ремонта изменяет как параметр S_i , так и параметр A_i . Избавимся от одной переменной,

выявив взаимосвязь между S_i и a_i . Возможный вариант такой взаимосвязи, заданный интервальными оценками, представлен в табл. 1 [3].

Монотонный и однозначный характер взаимосвязь $(A_i - a_i)$ с $(S_i - s_i)$ позволяет исключить $(S_i - s_i)$ из функции цели, оставив S_i как фактор, непосредственно влияющий на критерий:

$$U(S_i, (A_i - a_i)) = \prod_{i=1}^k I_i f_i(m_i) \quad (5)$$

Таблица 1
Взаимосвязь разности $(A_i - a_i)$ с $(S_i - s_i)$

$A_i - a_i$	$S_i - s_i$
0.8 $(A_i - a_i)$	1, если $S_i = 1$ S_i , если $S_i = 1$
0.6 $(A_i - a_i) = 0.8$	0.9, если $S_i = 0.9$ S_i , если $S_i = 0.9$
0.4 $(A_i - a_i) = 0.6$	0.7, если $S_i = 0.7$ S_i , если $S_i = 0.7$
0.2 $(A_i - a_i) = 0.4$	0.4, если $S_i = 0.4$ S_i , если $S_i = 0.4$
$(A_i - a_i) = 0.2$	0.2, если $S_i = 0.2$ S_i , если $S_i = 0.2$
пренебрежимо мало (проведение полного цикла ремонтных работ)	0

После подстановки (4) в (5), получаем:

$$U(a_i, m_i) S_i^{k_i} (A_i - a_i) \quad (6)$$

$$I_i = \min_{\substack{t \\ t_{p,max}}} \frac{p_{c.p.i}}{t} (M_i - m_i)$$

Решение поставленной задачи выполнено в работе [3] методом неопределённых множителей Лагранжа [6, 7].

Рассмотрим пример реализации найденного решения для оборудования АЭС.

Структурная схема алгоритма ОКПР по предупреждению аварийных ситуаций представлена на рис.1.

Проверка работоспособности алгоритма проводилась на тестовой системе, содержащей четыре группы оборудования, характеризующие влияние их элементов на безопасность АЭС.

Согласно нормативному документу НП-001-15 по влиянию элементов АЭС на безопасность устанавливаются четыре класса безопасности.

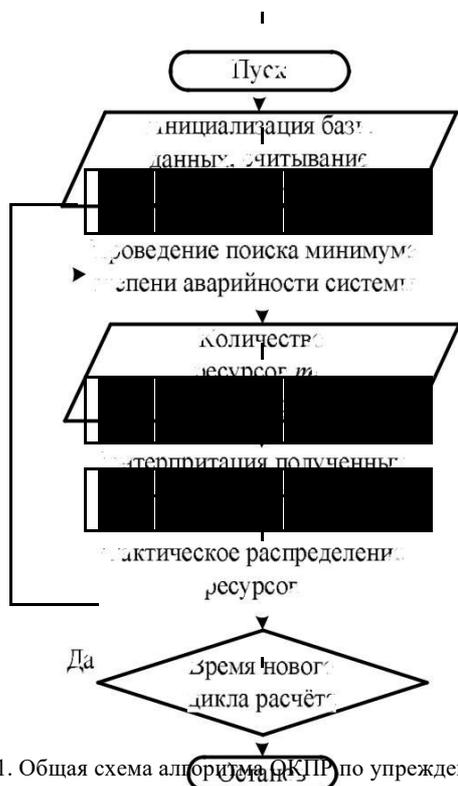


Рис. 1. Общая схема алгоритма ОКПР по предупреждению аварийных ситуаций

К классу 1 относятся ТВЭЛы и элементы АЭС,

отказы которых являются исходными событиями аварий, приводящими при проектном функционировании систем безопасности к повреждению ТВЭЛов с превышением максимального проектного предела. Значения максимального проектного предела повреждения ТВЭЛов устанавливаются в соответствии с

федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии.

К классу 2 относятся следующие элементы АЭС, не вошедшие в класс 1:

- элементы, отказы которых являются исходными событиями, приводящими к повреждению ТВЭЛов без превышения максимального проектного предела при проектном функционировании систем безопасности с учетом нормируемого для проектных аварий количества отказов в указанных системах;

- элементы систем безопасности, единичные отказы которых приводят в случае возникновения проектной аварии к нарушению установленных для таких аварий проектных пределов.

К классу 3 относятся элементы АЭС, важные для безопасности, не вошедшие в классы 1 и 2.

К классу 4 относятся элементы нормальной эксплуатации АЭС, не влияющие на безопасность и не вошедшие в классы 1, 2, 3.

Элементы, используемые для управления запроектными авариями, не вошедшие в классы безопасности 1, 2 или 3, также относятся к классу безопасности 4.

Значения важности оборудования I , нормативного количества ресурсов M , среднего времени ремонта $t_{p,ср.}$, средней наработки на отказ $t_{ср.нар.}$ заданы на основе экспертных оценок

специалистов НВАЭС. Параметры тестируемой системы представлены в табл. 2. Общее количество обслуживаемых единиц задано $N=10$.

Таблица 2

Параметры тестируемой системы

Класс безопасности оборудования	Важность объекта, I	Нормативное количество ресурсов, M	Среднее время ремонта $t_{p,ср.}$, ед.времени	Средняя наработка на отказ $t_{ср.нар.}$, ед.времени
Класс 1	0,8	10	3	15
Класс 2	0,6	4	2	3
Класс 3	0,2	8	5	5
Класс 4	0,2	8	5	5

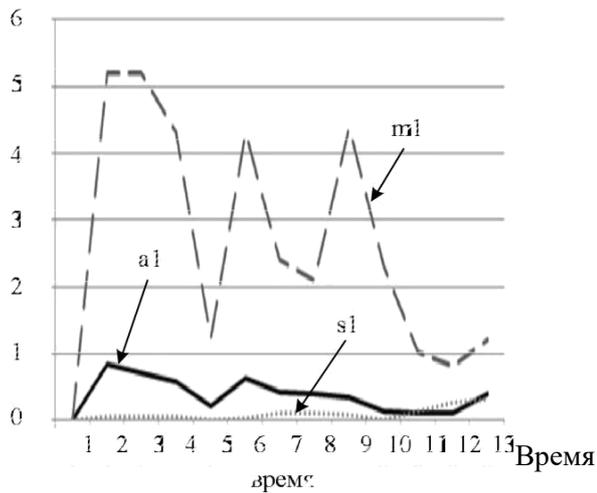
Графики требуемого изменения степени близости a_i к аварийной ситуации, количества используемых на оборудовании ресурсов обслуживания m_i , величины временного запаса S_i построены на рис. 2-5.

Очевидно, что алгоритм реагирует на случайные события увеличением запаса ресурсов, направляемых на соответствующий агрегат. В случае возникновения спорных ситуаций, алгоритм ОКПР от-

дает большую часть ресурсов тому оборудованию, которое наиболее важно для всего системного процесса (в данном примере оборудование классов 1 и 2). В момент завершения ремонтных работ на таких

объектах, единицы обслуживания отправляют обслуживать менее важные агрегаты с большей длительностью ремонта, тем самым определяя некото-

рую задержку в обеспечении маловажных мест производственной системы ресурсами обслуживания (оборудование классов 3 и 4 в отсчётах времени 11 и 7-8).



2. Графики изменяемых параметров для оборудования класса 4
оборудования класса 1

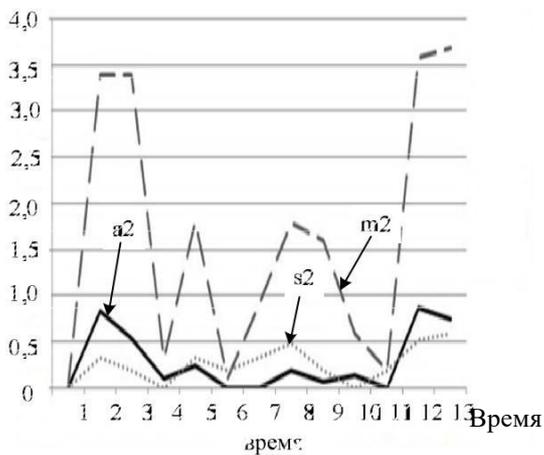


Рис. 3. Графики изменяемых параметров для
оборудования класса 2

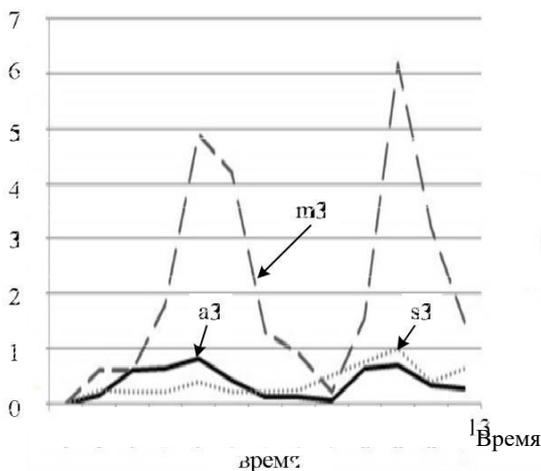


Рис. 4. Графики изменяемых параметров для
оборудования класса 3

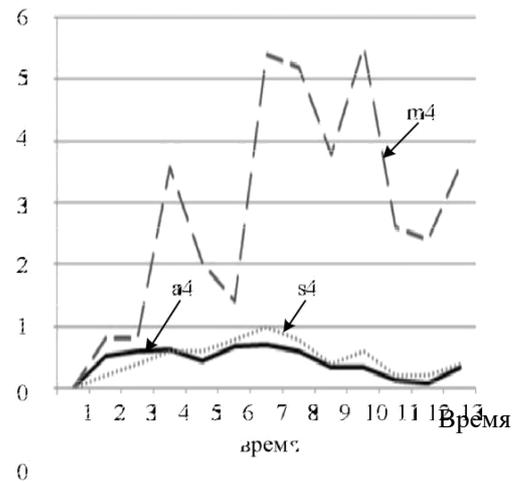


Рис. 5. Графики изменяемых параметров для Рис.

Также нельзя не заметить зависимость количества поступающих на элемент обслуживаемой системы ресурсов не только от увеличения возможности возникновения аварии и уменьшения запаса по времени, но и их комплексного воздействия на общую степень U аварийности обслуживаемой АЭС. Например, даже на наименее важных объектах классов 3 и 4 всегда выделяются некоторые ресурсы обслуживания, не допускающие в конечном счёте возникновения авральных режимов по устранению отказов.

Например, проектами АЭС химводоподготовка относится к элементам нормальной эксплуатации АЭС, не влияющим на безопасность (класс 4).

При этом следует учесть требование к реализации глубоководной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, и системы технических и организационных мер по защите барьеров. Система физических барьеров блока АЭС должна включать: границу контура теплоносителя реактора, герметичное ограждение РУ и биологическую защиту, а также, как правило, топливную матрицу и оболочку ТВЭЛа.

Важность химводочистки (химводоподготовки) заключается в том, что химобессоленная вода используется в качестве теплоносителя на АЭС с водяными реакторами. Обеспечение проектного теплоотода от ТВЭЛ (целостность оболочек ТВЭЛ) осуществляется теплоносителем первого контура. Теплоотвод от теплоносителя первого контура вносится в воду второго контура в парогенераторах (граница контура теплоносителя реактора).

Следует учесть, что рассматриваемые сценарии возможных аварий, а также реальные инциденты, происходившие на АЭС, в конечном итоге связаны с потерей теплоотода от активной зоны.

Таким образом, надежность химводочистки (оборудования класса 4) должна обеспечивать проектные объемы воды надлежащего качества, необ-

ходимые для нормальной эксплуатации реакторной установки и вспомогательных систем, а также для охлаждения реактора при проектных и запроектных авариях.

Из вышеизложенных расчетов и рассуждений можно сделать вывод о том, что оборудование абсолютно всех классов безопасности очень значимо при оптимальном календарном планировании работ в системе безаварийного управления АЭС.

Литература

1. Ткалич, С.А. Диагностические экспертные системы безаварийного управления технологическими процессами [Текст] / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2007. - Т. 3. - №5. - С.38-43.
2. Ткалич, С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально-опасными производствами [Текст] / С.А. Ткалич, В.П. Поваров, А.В. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. - Т. 10. - № 5-1.- С. 129-132.

3. Ткалич, С.А. Алгоритмизация оптимального календарного планирования в системе безаварийного управления производством [Текст] / С.А. Ткалич // Электротехнические комплексы и системы управления. -2011. - № 1 (21). – С. 60-65.

4. Ткалич, С.А. Нейросетевая модель процесса прогнозирования аварийной ситуации [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. – 2008. - №3.1. - С.196-200.

5. Ткалич, С.А. Исследование системы прогнозирования аварийных ситуаций на базе термодинамической модели [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. – 2008. -№3.3(33). -С.399-403.

6. Таха, Х. Введение в исследование операций [Текст] / Х. Таха. – М.: Вильямс, 2007. - Кн. 2. – 912с.

7. Алексеева, Е.В. Теория принятия решений [Текст] / Е.В. Алексеева. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. – 412с.

Воронежский государственный технический университет

OPTIMAL CALENDAR SCHEDULING OF WORK IN SYSTEM OF ACCIDENT-FREE MANAGEMENT OF NUCLEAR POWER PLANTS

S.A. Tkalich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergeytkalich@mail.ru

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

The possibility of optimal scheduling of maintenance work in the complex of measures on creation of system trouble-free management of extreme productions. The main parameters considered indicator of lead time, which reflects the temporal distance of the object to the alleged failure, the degree of proximity of the object to the emergency determined prediction system, the degree of influence of the accident a separate object on the functioning of the whole system, determined by an expert. The mathematical formulation of the problem is reduced to finding the extremum of the objective function: the degree of the accident served system. The solution of the task performed by the method of undetermined Lagrange multipliers. An algorithm for minimizing the degree of emergency systems. An example of the implementation of the solution found for the four classes of safety equipment of NPP. From the analysis of the graphs to their proximity to the emergency, the amount of resources used in equipment maintenance and the amount of time available conclusions about the importance of safety equipment classes

Key words: calendar planning, algorithmization, forecasting, accident-free management

References

1. Tkalich S.A. Diagnosticheskie jekspertnye sistemy bezavarijnogo upravlenija tehnologicheskimi processami // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, tom 3, №5, 2007, s.38-43.
2. Tkalich S.A., Povarov V.P., Burkovskij A.V. Modeli prinjatija reshenij v sistemah upravlenija potencial'no-opasnymi proizvodstvami // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2014. T. 10. № 5-1. S. 129-132.
3. Tkalich S.A. Algoritimizacija optimal'nogo kalendar'nogo planirovanija v sisteme bezavarijnogo upravlenija proizvodstvom// Jelektrotehničeskije komplekсы i sistemy upravlenija, № 1 (21), 2011. – S. 60-65.
4. Tkalich S.A. Nejrosetevaja model' processa prognozirovanija avarijnoj situacii // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii, №3.1, 2008, s.196-200.
5. Tkalich S.A. Issledovanie sistemy prognozirovanija avarijnyh situacij na baze termodinamicheskoj modeli // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii, №3.3(33), 2008, s.399-403.
6. Taha H. Vvedenie v issledovanie operacij. Kn. 2. – М.: Vil'jams, 2007. – 912s.
7. Alekseeva E.V. Teorija prinjatija reshenij / E.V.Alekseeva. – М.: MGTU imeni N.Je. Bauman, 2008. – 412s.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В МИКРОКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

Д.А. Коновалов, И.Н. Лазаренко, Н.Н. Кожухов, И.Г. Дроздов

Настоящая работа посвящена разработке методов интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем термостабилизации. Была предложена одна из возможных схем гибридной системы термостабилизации. Определены подходы к созданию конструкции теплообменника для охлаждения электронного модуля. В качестве возможных конструктивных решений для теплообменников с целью охлаждения электронного модуля предложены три модели: модель с плоским каналом, модель с плоским каналом, заполненным сплошной пористой средой, и модель с пористыми вставками с межканальной транспирацией охладителя. Для всех трех моделей произведены теплогидравлические расчеты. С целью повышения эффективности работы теплообменника рассмотрены предпочтительные способы интенсификации теплообмена: использование наножидкости в качестве теплоносителя, реализация пульсаций при его транспортировке и наличие фазового перехода

Ключевые слова: интенсификация, микроканальный теплообменник, гибридная система термостабилизации

Введение

Современное развитие телекоммуникационного оборудования связано с применением компактных устройств с возрастающей энергонапряженностью и высоким удельным тепловыделением. Например, для модулей спутниковой связи, передающих устройств наземного базирования, телекоммуникационного оборудования критическая температура может достигать 125 С, в то время как оптимальная находится в диапазоне от 40 до 80 С. Зачастую для отдельных элементов электронных устройств требуется изменение диапазона температуры с точностью $\pm 0,1$ °С, что приводит к дополнительным требованиям для систем регулирования в составе систем термостабилизации.

В различных климатических условиях, актуален вопрос работы электронных модулей не только при повышенных положительных (+65 °С), но и при отрицательных температурах (– 40 °С) окружающей среды, что также приводит к необходимости решения проблемы термостабилизации.

В настоящее время существует множество способов термостабилизации электронной аппаратуры. Одним из них является применение гибридных систем, что позволяет обеспечить оптимальную работу оборудования. Гибридные системы термостабилизации – это системы,

обеспечивающие как охлаждение, так и подогрев компонентов самой системы и элементов электронных модулей, на которых они установлены с целью обеспечения надежной работы в условиях оптимального энергопотребления. К их основным элементам можно отнести следующие:

- гибридные теплообменники на основе пористых и микроканальных элементов;
- системы доохлаживания/подогрева теплоносителя на основе элементов Пельтье;
- микропленочные резистивные нагревательные элементы;
- внешние теплообменные модули с интенсифицирующими элементами.

Гибридная система термостабилизации

Один из возможных вариантов схемы гибридной системы термостабилизации представлен на рис. 1.

Гибридная система включает в себя два контура:

- контур 1 МКТ (жидкостный);
- контур 2 ТЭМО (воздушный).

Схема движения теплоносителя контура 1 является замкнутой. Теплоноситель первого контура насосом НЦ подается в микроканальный теплообменник (МКТ), где после процесса теплообмена, поступает в теплообменный аппарат блока охлаждения на основе ТЭМО (термоэлектрический модуль охлаждения на основе элементов Пельтье) и затем возвращается в насос НЦ. ТЭМО позволяет доохлаживать теплоноситель до необходимой температуры в том случае, если она не соответствует значениям на выходе из теплообменника МКТ.

Коновалов Дмитрий Альбертович – ВГТУ, канд. техн.

наук, доцент, тел. 8(473) 272-87-82, e-mail: dmikonovalov@yandex.ru

Лазаренко Игорь Николаевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473) 277-27-55, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Кожухов Николай Николаевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-76-62, e-mail:

k0zhukhov@yandex.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 277-27-55, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

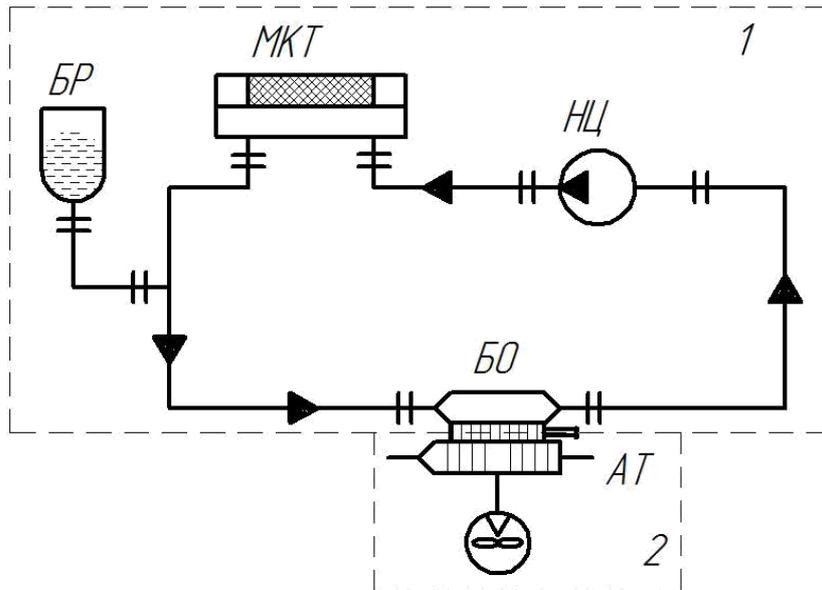


Рис. 1. Принципиальная пневмогидравлическая схема гибридной системы локальной термостабилизации: АТ – воздушный теплообменный аппарат (кулер); БО – блок охлаждения на основе ТЭМО (жидкостно-воздушный); БР – расширительный бак; МКТ – микроканальный теплообменник; НЦ – насос

Насос регулирует расход теплоносителя за счет изменения частоты вращения ротора, что также экономит электроэнергию. Расширительный бак БР служит для заправки системы теплоносителем и компенсации его расширения в процессе работы.

Необходимая температура теплоносителя в контуре 1 поддерживается с помощью блока охлаждения БО за счет регулировки мощности (холодопроизводительности) ТЭМО.

В данной работе рассмотрены методы интенсификации теплообмена в микроканальных теплообменниках гибридных систем охлаждения.

Конструктивное решение

Самым теплонпряженным элементом представленной гибридной системы является теплообменник МКТ. Одним из наиболее эффективных способов защиты считается пористое и микроканальное охлаждение [1-8], которое предусматривает изготовление теплонпряженных конструкций или их деталей из пористых материалов, через поры которых во время работы подается охладитель (газ или жидкость) на поверхность, соприкасающуюся с нагретой рабочей средой.

В качестве возможных конструктивных решений для теплообменников с целью охлаждения электронного модуля предлагаются три модели:

- модель с плоским каналом;

- модель с плоским каналом, заполненной сплошной пористой средой;

- модель с пористыми вставками с межканальной транспирацией охладителя.

Модель с плоским каналом

Данная модель представляет собой квадратный лист из меди, внутри которого находится канал прямоугольного сечения шириной 22 мм. Геометрические размеры и граничные условия для данной модели приведены на рис. 2. Подвод и отвод охладителя показаны условно. Теплоносителем для данной модели выбрана вода.

Предполагаем, что внутренние тепловыделения отсутствуют, течение стационарное двумерное, жидкость несжимаема. В этом случае, течение жидкости и теплообмен в плоском канале в общем виде описываются системой, состоящей из следующих уравнений:

- уравнение движения:

$$-\text{grad}P, \quad (1)$$

- уравнение неразрывности:

$$\frac{x}{x} - \frac{y}{y} = 0, \quad (2)$$

- уравнение энергии:

$$-\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial y} = x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; T – температура жидкости, К; λ – теплопроводность

жидкости, Вт/(м·К), - скорость, м/с; Р – давление, Па; - время, с.

При построении модели в качестве граничных условий на поверхности нагрева принимались граничные условия 2 рода, а удельный тепловой поток задавался, равным 100 Вт/см^2 .

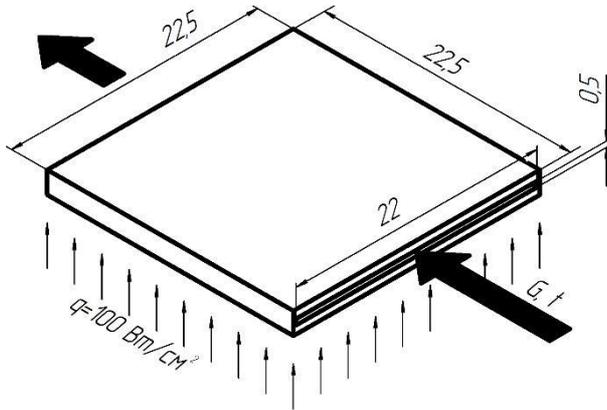


Рис. 2. Модель с плоским каналом

С учетом геометрии поверхности $22,5 \times 22,5$ мм теплосъем составил около 500 Вт. Тепловой поток через остальные стенки принимался равным нулю, что соответствует условиям адиабатности. На входе охладителя в теплообменник задавались граничные условия 1 рода.

Расчеты проводились с использованием программного комплекса Ansys для четырех температур охладителя на входе равными 65°C , 55°C , 50°C , 45°C . При этом в ходе расчета оценивалась температура поверхности нагрева. Для оптимальной работы электронного оборудования она не должна превышать 80°C . В результате расчета определялись такие параметры как температура охладителя на выходе и перепад давления в теплообменнике.

Результаты расчета модели с плоским каналом в виде графиков представлены на рис. 3-5.

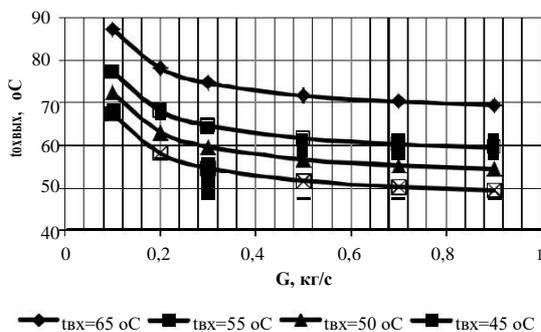


Рис. 3. Зависимость температуры охладителя на выходе из теплообменника от расхода

Расчеты показывают, что использование модели с плоским каналом решает задачу охлаждения электронного модуля с заданными характеристиками.

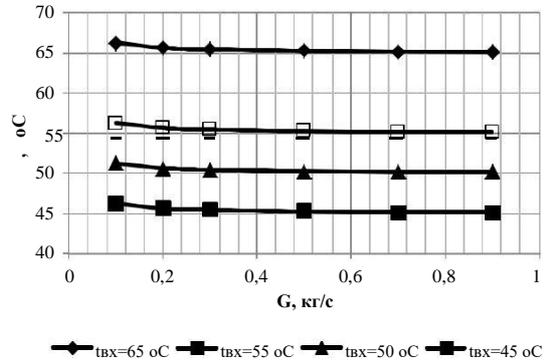


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности нагрева от расхода

При этом расход охладителя оказывается значительным для данной конструкции, что потребует применения энергоемких насосов, специальных штуцеров и трубопроводов для транспортировки теплоносителя, что в свою очередь приведет к увеличению массогабаритных характеристик конструкции. К тому же система, скорее всего, будет обладать повышенным уровнем шума.

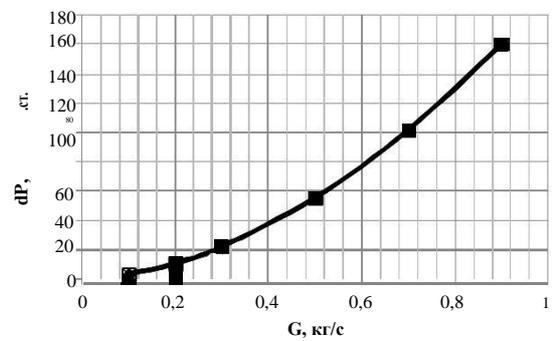


Рис. 5. Зависимость перепада давления в теплообменнике от расхода

Одним из способов более равномерного распределения температур по высоте канала в теплообменниках и повышения эффективности теплоотвода является использование развитых поверхностей на основе пористых вставок.

Модель с плоским каналом, заполненным сплошной пористой средой

С целью интенсификации теплообмена, сокращения энергозатрат на транспортировку теплоносителя предлагается модель с плоским каналом, заполненным пористой средой. Мате-

риалом пористой среды является медь, обладающая высокой теплопроводностью. Значение пористости составляет $\Pi 0,4$. Схема подвода и отвода охладителя, геометрические размеры соответствуют модели с плоским каналом (рис. 2).

Течение жидкости и теплообмен в плоском канале заполненной пористой средой в общем виде описываются системой, состоящей из следующих уравнений:

- уравнение движения:

$$-\text{grad}P^2 \quad - , \quad (4)$$

где $\sqrt{\frac{2}{x} \frac{2}{y}}$

$$\frac{x}{x} \frac{P}{x} \quad x , \quad (5)$$

$$\frac{y}{y} \frac{P}{y} \quad y , \quad (6)$$

- уравнение энергии:

$$\frac{\text{ис}}{\text{оx охx}} \frac{T}{x} \frac{\text{эф}}{x} \frac{T}{y} \frac{\text{эф}}{y} \frac{T}{C_{\text{эф эф}}} \frac{T}{x} \quad , \quad (7)$$

где Π – пористость; C – теплопроводность Дж/(кг·К); эф – вязкостный коэффициент, м^{-2} ; ис – инерционный коэффициент, м^{-1} .

Для однотемпературной модели уравнение энергии запишется следующим образом

$$\frac{T}{C_{\text{эф эф}}} \frac{\text{эф}}{T} \frac{\Pi C_{\text{оx ох}}}{C_{\text{эф эф}}} \text{grad} T , \quad (8)$$

Граничные условия аналогичны предыдущей модели. Коэффициенты пористой матрицы были определены из следующих соотношений [5]:

- вязкостный

$$171 \Pi^2 \Pi^3 d_{\text{ч}}^2 ; \quad (9)$$

- инерционный

$$0,635 \Pi \Pi^4 d_{\text{ч}}^1 , \quad (10)$$

где Π – пористость материала; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частиц пористой вставки, м.

Их значения составили $2,423 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^2$ и $456942,2 \text{ 1/м}$ соответственно.

Расчеты проводились для входных температур охладителя, аналогичных для модели с плоским каналом. Для оценки теплового состояния использовалась однотемпературная модель теплообмена, базирующаяся на равенстве температур пористой матрицы и охладителя. В результате была рассчитана температура охладителя на выходе и перепад давления в теплообменнике.

Результаты расчета модели с плоским каналом, заполненным пористой средой в виде графиков представлены на рис. 6-8.

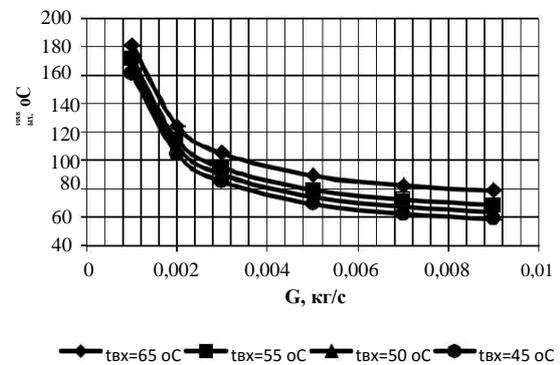


Рис. 6. Зависимость температуры охладителя на выходе из теплообменника от расхода

Результаты показывают, что модель с каналом, заполненной сплошной пористой средой позволяет осуществить расчетный теплоотвод при расходах на $1 \div 2$ порядка ниже, по сравнению с моделью с плоским каналом.

При этом наблюдается выравнивание температур по высоте канала, что повышает эффективность использования теплоносителя и, как следствие, высокую интенсивность теплообмена между охладителем и пористой структурой, обладающей развитой поверхностью. Модель с плоским каналом, заполненным сплошной пористой средой, несмотря на небольшие размеры, характеризуется значительными потерями давления, что также ведет к росту энергозатрат на транспортировку теплоносителя.

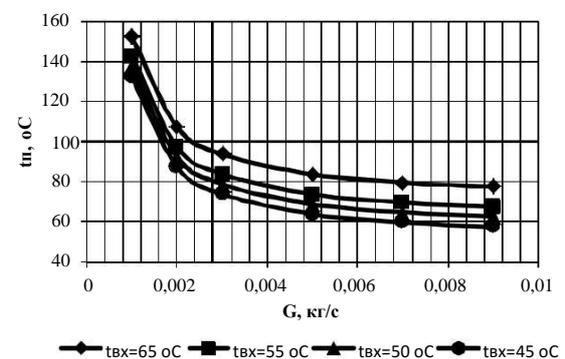


Рис. 7. Зависимость температуры поверхности нагрева от расхода

С целью сохранения эффективности теплообмена и существенного снижения затрат на транспортировку теплоносителя рассмотрим

модель теплообменника с пористыми ребрами и межканальной транспирацией охладителя.

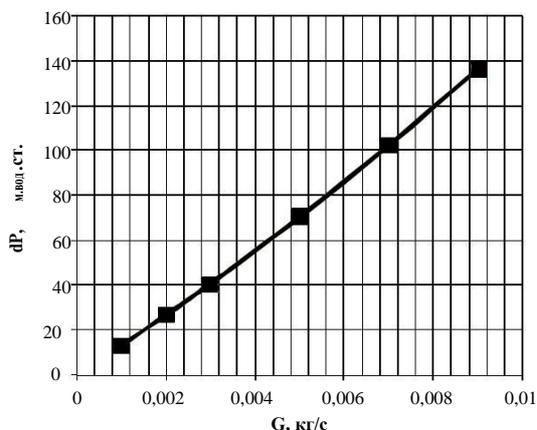


Рис. 8. Зависимость перепада давления в теплообменнике от расхода

Модель с пористыми ребрами и межканальной транспирацией охладителя

Модель представляет собой плоский канал в котором расположены 4 пористых ребра. В качестве ребер предлагается использовать пористую медь (Π 0,4). Геометрические размеры модели и схема межканальной транспирации охладителя приведены на рис. 9. Подвод и отвод охладителя осуществляется через установленные в крышке штуцеры (не показаны).

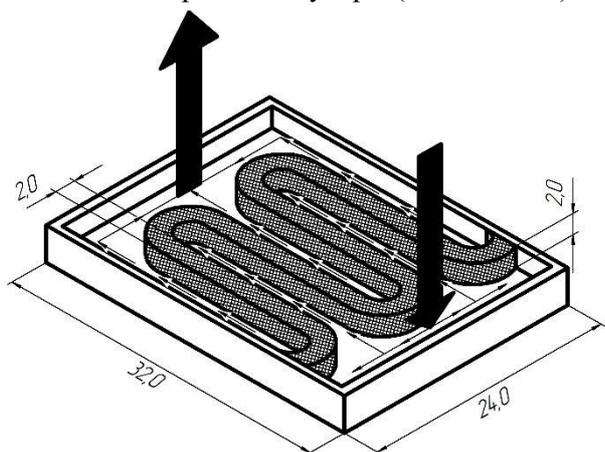


Рис. 9. Модель с пористыми ребрами с межканальной транспирацией охладителя

Исходные данные и граничные условия аналогичны условиям моделей, рассмотренных выше. Результаты расчета модели с пористыми ребрами с межканальной транспирацией охладителя представлены в виде графиков на рис. 10-12.

Результаты показывают, что модель с пористыми ребрами с межканальной транспира-

цией охладителя позволяет осуществить расчетный теплоотвод при расходах на один порядок ниже, по сравнению с моделью с плоским каналом.

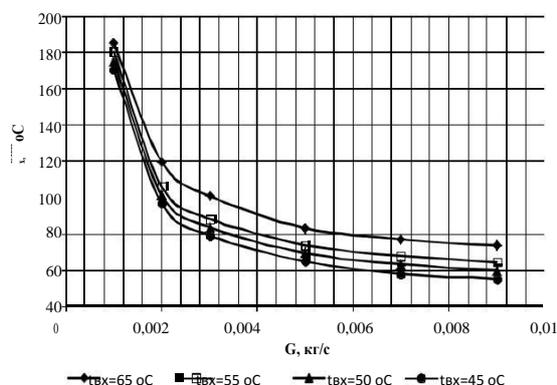


Рис. 10. Зависимость температуры охладителя на выходе из теплообменника от расхода

Потери давления составляют 2 м. вод. ст. в модели с пористыми ребрами с межканальной транспирацией и 85 м. вод. ст. для сплошной пористой среды, но при этом не снижается эффективность теплообмена. Таким образом, в качестве наиболее эффективной следует признать микроканальный теплообменник с пористыми ребрами и межканальной транспирацией теплоносителя.

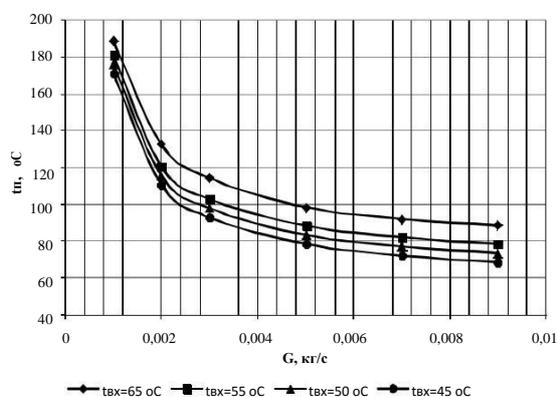


Рис. 11. Зависимость температуры поверхности нагрева от расхода

Принимая во внимание результаты моделирования работы различных моделей теплообменников, было разработано несколько вариантов конструкции микроканального теплообменника (МКТ) с межканальной транспирацией теплоносителя. Во всех представленных конструкциях пористая вставка расположена на задней крышке (подложке) МКТ. Уплотнения, а также подвод теплоносителя располагаются на верхней крышке МКТ.

Возможные варианты расположения пористой вставки на подложке и схемы движения теплоносителя представлены на рис. 13. Стрелками показаны подвод и отвод охладителя. Конструкции, приведенные на рис. 13а и 13б на настоящий момент времени являются рабочими вариантами [9-11].

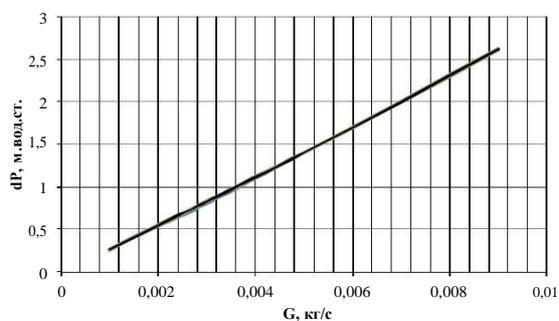


Рис. 12. Зависимость перепада давления в теплообменнике от расхода

Теплоноситель подаётся с одной стороны, проходит пористую вставку по рёбрам и отводится с другой стороны. Пористая вставка имеет определенную высоту и сверху прижимается крышкой, что исключает перетекание рабочего тела сверху ребра. Течение теплоносителя, также исключено с торцов ребра с помощью непроницаемых стенок. Таким образом, теплоноситель фильтруется по нормали к длинной стороне ребра.

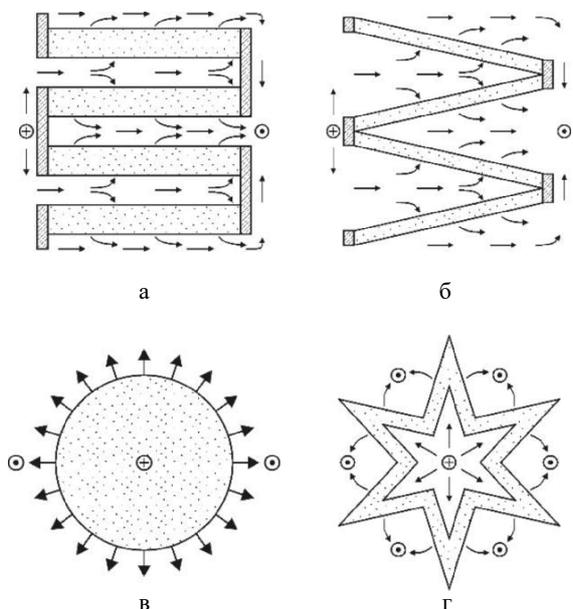


Рис. 13. Варианты конструкции и расположения пористой вставки в МКТ

В отличие от вариантов, представленных на рис. 13.а, б, пористая вставка (рис. 13в) яв-

ляется сплошной и имеет цилиндрическую форму. Она занимает ту же площадь, что и в предыдущем варианте. Теплоноситель подаётся в центр пористой вставки, распределяясь равномерно, отводится через кольцевой коллектор с помощью двух отводов. Кольцевой коллектор образуется за счет верхней крышки МКТ и пористой вставки. Пористая вставка может иметь прямоугольную или квадратную форму.

В варианте, представленном на рис. 13г, пористая вставка выполнена в форме «звезды». Теплоноситель подаётся в центр пористой вставки, распределяясь равномерно, отводится с помощью двух отводов, расположенных в крайних зонах крышки.

С целью дополнительной интенсификации теплообмена в элементах гибридной системы охлаждения рассмотрим следующие варианты для дальнейших исследований.

Интенсификация теплообмена на наноповерхностях. Наножидкости

Применение развитых поверхностей микро и наномасштаба позволяет увеличить поверхность теплообмена путем создания соответствующего рельефа, а также способствует разрушению пограничного слоя. Большинство работ показывают, что в целом наблюдается увеличение интенсивности происходящих процессов. При наличии развитой поверхности сформированной за счет микро и нанопокровтий увеличивается коэффициент теплоотдачи, что позволяет отводить высокие удельные тепловые потоки с поверхностей, имеющих малые размеры (элементы электронного и телекоммуникационного оборудования).

Наряду с использованием покрытий микро и наномасштаба для интенсификации теплообмена можно применять наножидкости. Высокий эффект при этом достигается при наличии фазового перехода для теплоносителя. При этом наночастицы, находящиеся в жидкости являются центрами парообразования, что позволяет реализовать развитое пузырьковое кипение в объеме жидкости [13-20].

Интенсификация теплообмена за счет пульсаций течения охладителя

Системы охлаждения продолжительное время функционируют на стационарных режимах. Однако при периодическом или импульсном режимах работы переходные процессы могут оказывать существенное (положитель-

ное/отрицательное) влияние на работу пористых и микроканальных систем охлаждения. Например, при малых возмущениях, которые могут быть вызваны вибрациями стенок, пульсацией охладителя в подающих коллекторах и т.п. Современные исследования свидетельствуют о восприимчивости «пористая среда – охладитель» к возмущениям подобного рода.

Выбор способов интенсификации теплообмена для МКТ

Применение в качестве охлаждающих элементов для теплообменников является использование пористых ребер, а для снижения гидравлического сопротивления следует применять межканальную транспирацию охладителя. Процесс теплообмена может быть также интенсифицирован с помощью пульсаций охладителя в области низких частот. Существенная интенсификация в пористых теплообменниках может быть достигнута за счет изменения пористости элемента. Снижение гидравлического сопротивления при росте (сохранении) коэффициентов теплоотдачи достигается за счет применения высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) [6].

Одним из предпочтительных способов интенсификации является наличие фазового перехода в пористом теплообменнике [21-25]. Наличие развитой структуры пористого каркаса позволяет реализовать развитое пузырьковое кипение и реализовать «защиту» от перехода к пленочному кипению. Данный способ интенсификации целесообразно применять при критических режимах работы системы, обеспечив надежный теплоотвод (превышение расчетных температур окружающего воздуха, электронных компонентов, аварийный отказ одного (нескольких) элементов системы гибридной термостабилизации). При этом способ интенсификации с фазовым переходом характеризуется метастабильным состоянием, существенным колебанием давления в системе, что усложняет разработку ее отдельных элементов. Применение микро- и наноповерхностей (покрытий) целесообразно для элементов Пельтье и внешнего теплообменника. В случае микроканального теплообменника пористая среда представляет собой систему микро- и наноканалов.

Таким образом, одним из векторов развития интенсификации теплообмена в микроканальном пористом теплообменном элементе является применение низкочастотных pulsa-

ций и фазового перехода в условиях критического режима работы.

Выводы

В гибридной системе термостабилизации наиболее предпочтительным способом интенсификации с учётом возможного движения теплоносителя в ламинарном режиме, является осцилляция давления (расхода) теплоносителя в МКТ. Причём применение данного способа ограничено узким частотным диапазоном и при выходе из него эффективность нивелируется.

Использование фазового перехода в МКТ является предпочтительным ввиду получения высоких коэффициентов теплоотдачи, что позволит увеличить теплосъём. Однако, парообразование теплоносителей в зоне перегрева создаёт стохастические пульсации гидродинамических характеристик, что интегрально может привести к неустойчивому процессу теплообмена всей системы.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0202.

Литература

1. Калинин, Э.К. Эффективные поверхности теплообмена [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
2. Разработка и моделирование микроканальных систем охлаждения [Текст]: монография / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов // Воронеж: ВГТУ, 2013. – 222 с.
3. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах [Текст]: монография / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов // М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 532 с.
4. Калинин, Э.К. Интенсификация теплоотдачи в каналах [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.Л. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 200 с.
5. Поляев, В.М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.
6. Попов, И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена [Текст]: монография / И.А. Попов; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2007. – 240 с.
7. Кузнецов, Г.В. Об одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника, 2008. – Т. 37. – № 2. – С. 150-158.
8. Проектирование и испытания охладителей силовых полупроводниковых приборов [Текст] / С.А. Панфи-

лов, В.М. Каликанов, Ю.А. Фомин, А.С. Саванин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008. – № 3. – С. 41-43.

9. Пат. 51441 Российская Федерация, МПК H01L 23/34. Устройство охлаждения электронных компонентов [Текст] / Дроздов И.Г., Мозговой Н.В., Шматов Д.П., Кожухов Н.Н.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2005121936/22; заявл. 11.07.2005; опубл. 10.08.2004, Бюл. № 4. – 5 с.

10. Пат. 58788 Российская Федерация, МПК H01L 23/34. Устройство охлаждения для электронных компонентов [Текст] / Дроздов И.Г., Кожухов Н.Н., Мозговой Н.В., Коновалов Д.А., Шматов Д.П.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. – № 2006113838/22; заявл. 24.04.2006; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33. – 4 с.

11. Пат. 2440641 Российская Федерация, МПК H01L 23/34. Устройство отвода теплоты от кристалла полупроводниковой микросхемы [Текст] / Савинков А.Ю., Дроздов И.Г., Шматов Д.П., Дахин С.В., Коновалов Д.А., Кожухов Н.Н., Небольсин В.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «КОДЮФОН». – № 2010146036/28; заявл. 10.11.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. – 8 с.

12. Об одном подходе к созданию модели интегрированного теплообменника [Текст] / Д.А. Коновалов, И.Г. Дроздов, Д.П. Шматов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. В 2-х т. – М.: Изд. МЭИ, 2011. – Т.1. – С. 431-434.

13. Интенсификация теплообмена при кипении жидкостей на сферах с керамическими субмикронными покрытиями на основе Al_2O_3 [Текст] / К.И. Белов, В.М. Жуков, Ю.А. Кузма-Кичта, В.А. Леньков // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (24-29 мая 2015 г., г. Звенигород). – М.: Изд. МЭИ, 2015. – С. 281-284.

14. Исследование кипения на поверхности с рельефом из наночастиц [Текст] / М.В. Шустов, Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, П.С. Чурсин // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева

(24-29 мая 2015 г., г. Звенигород). – М.: Изд. МЭИ, 2015. – С. 346-349.

15. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом [Текст] / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, М.В. Шустов [и др.] // Теплоэнергетика. – М.: ООО МАИК «Наука/Интерпериодика», 2014. – № 3. – С. 35-38.

16. Шустов М.В. Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 : защищена 22.04.15: утв. 12.11.15 / Шустов Михаил Владимирович. М., 2003. – 119 с.

17. Исследование кипения при естественной циркуляции в трубе с рельефом из наночастиц [Текст] / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, Н.А. Стенина [и др.] // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – Т. 2. – С. 55-56.

18. Effect of nanopartic leson heat transfer in mini double-pipe heat exchangers in turbulent flow [Text] / Aghayari Reza [and oth.] // Heat MassTransfer, 2015. – № 51. – P. 301-306.

19. Бардаханов, С.П. Исследование теплопроводности наножидкостей на основе наночастиц оксида алюминия [Текст] / С.П. Бардаханов, С.А. Новопашин, М.А. Серебрякова // Наносистемы: физика, химия, математика, 2012. – № 3 (1). – С. 27-33.

20. Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости [Текст] / А.В. Жаров, Н.Г. Савинский, А.А. Павлов, А.Н. Евдокимов // Физико-математические науки фундаментальные исследования, 2014. – № 8. – С. 1345-1350.

21. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1970. – 660 с.

22. Ягов, В.В. Научное наследие Д.А. Лабунцова и современное представление о пузырьковом кипении [Текст] / В.В. Ягов // Теплоэнергетика, 1995. – № 3. – С. 2-10.

23. Лабунцов, Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике [Текст] / Д.А. Лабунцов // М.: МЭИ, 2000. – 388 с.

24. Овсянник, А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей [Текст] / А.В. Овсянник. – Гомель: ГГТУ им. Г.С. Сухого, 2012. – 284 с.

25. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях / Ю.Ф. Гортышев, И.А. Попов, Н.Н. Зубков [и др.] // Труды Акадэнерго, 2012. – Ч. 1. – С. 14-31.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF METHODS FOR IMPROVED HEAT TRANSFER IN MICROCHANNEL HEAT EXCHANGERS HYBRID COOLING SYSTEMS

D.A. Konovalov, Assoc. Prof. of Dept of Theoretical and industrial heat power engineering, Ph. D. in Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dmikonovalov@yandex.ru

I.N. Lazarenko, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

N.N. Kozhukhov, Assoc. Prof. of Dept of Theoretical and industrial heat power engineering, Ph. D. in Engineering, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: k0zhukhov@yandex.ru

I.G. Drozdov, Prof., Head of Dept. of Theoretical and industrial heat power engineering, D. Sc. in Engineering, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

The present work is devoted to the development of heat transfer enhancement techniques in microchannel heat exchangers, thermal stabilization of hybrid systems. One of the possible schemes for thermal stabilization of the hybrid system was proposed. Approaches to the creation of heat exchanger design for cooling the electronic module. As possible design solutions for heat exchangers for cooling the electronic module offered three models: - model with a flat channel - channel model with a flat-filled porous medium and solid model with porous inserts with inter-channel transpiration cooling. For all three models produced thermal-hydraulic calculations. In order to improve the efficiency of the heat exchanger to the preferred methods for intensification of heat transfer: the use of nanofluids as coolant, the implementation of pulsations in transit and presence of phase transition

Key words: intensification, microchannel heat exchanger, a hybrid system of thermal stabilization

References

1. Kalinin Je.K., Drejcer G.A., Kopp I.Z. Effektivnye poverhnosti teploobmena [Efficient heat transfer surface]. M.: Energoatomizdat, 1998. – 408 p.
2. Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. Razrabotka i modelirovanie mikrokanalnykh sistem okhlazhdeniia [Design and modeling of micro-channel cooling systems]. Voronezh, 2013. – 222 p.
3. Dziubenko B.V., Kuzma-Kichta Iu.A., Leontev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensifikatsiia teplo- i massoobmena na makro-, mikro- i nanomasshtabakh [The intensification of heat and mass transfer at the macro, micro and nano scale]. M.: FGUP «TcNIIATOMINFORM», 2008. – 532 p.
4. Kalinin E.K., Drejcer G.A., Iarkho S.L. Intensifikatsiia teplootdachi v kanalakh [Intensification of heat transfer in the channels]. M.: Mashinostroenie, 1990. – 200 p.
5. Poliaev V.M., Maiorov V.A., Vasilev L.L. Gidrodinamika i teploobmen v poristykh elementakh konstruktsii letatelnykh apparatov [Hydrodynamics and heat transfer in the porous structural elements of aircrafts]. M.: Mashinostroenie, 1988. – 168 p.
6. Popov I.A. Gidrodinamika i teploobmen v poristykh teploobmennyykh elementakh i apparatakh. Intensifikatsiia teploobmena [Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and devices. Intensification of heat exchange]. Kazan: Tcentr innovatsionnykh tekhnologii, 2007. – 240 p.
7. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Ob odnom podkhode k matematicheskomu modelirovaniu teplovykh rezhimov radioelektronnoi apparatury i elektronnoi tekhniki [An approach to mathematical modeling of thermal modes of electronic equipment and electronic engineering]. Mikroelektronika, 2008; 37; 2 – 150-158.
8. Panfilov C.A., Kalikanov V.M., Fomin Iu.A., Savanin A.S. Proektirovanie i ispytaniia okhladitelei silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Design and testing of cooling power semiconductors]. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika, 2008; 3 – 41-43.
9. Pat. 51441 Russian Federation, IPC H01L 23/34. Ustroistvo okhlazhdeniia elektronnykh komponentov [The cooling device of electronic components]. Drozdov I.G., Mozgovoi N.V., Shmatov D.P., Kozhukhov N.N. Voronezh State Technical University. - № 2005121936/22; 11.07.2005; 10.08.2004; № 4. – 5 p.
10. Pat. 58788 Russian Federation, IPC H01L 23/34. Ustroistvo okhlazhdeniia dlia elektronnykh komponentov [Cooling device for electronic components]. Drozdov I.G., Kozhukhov N.N., Mozgovoi N.V., Konovalov D.A., Shmatov D.P.; Voronezh State Technical University. - № 2006113838/22; 24.04.2006; 27.11.2006; 33. – 4 p.
11. Pat. 2440641, IPC H01L 23/34. Ustroistvo otvoda teploty ot kristalla poluprovodnikovoi mikroskhemy [Removing heat from the device chip semiconductor crystal]. Savinkov A.Iu., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Konovalov D.A., Kozhukhov N.N., Nebolsin V.A.; Zakrytoe aktsionerhoe obshchestvo «KODOFON». – № 2010146036/28; 10.11.2010; 20.01.2012; № 2. – 8 p.
12. Konovalov D.A., Drozdov I.G., Shmatov D.P., Dakhin S.V., Kozhukhov N.N. Ob odnom podkhode k sozdaniiu modeli integrirovannogo teploobmennika [An approach to the creation of a model of an integrated heat exchanger]. Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XVIII Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leonteva. M.: Izd. MEI, 2011; 1 – 431-434.
13. Belov K.I., Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Iu.A., Lenkov V.A. Intensifikatsiia teploobmena pri kipenii zhidkosti na sferakh s keramicheskimi submikronnymi pokrytiiami na osnove AL_2O_3 [Intensification of heat exchange with boiling liquid on areas with submicron ceramic coatings based on AL_2O_3]. Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XKh Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leonteva. M.: Izd. MEI, 2015 – 281-284.
14. Shustov M.V., Kuzma-Kichta Iu.A., Lavrikov A.V., Chursin P.S. Issledovanie kipeniia na poverkhnosti s relefom iz nanochastitc [Research on the boiling surface topography of nanoparticles]. Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XKh Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leonteva. M.: Izd. MEI, 2015 – 346-349.
15. Iu.A. Kuzma-Kichta, A.V. Lavrikov, M.V. Shustov and others. Issledovanie intensifikatsii teploobmena pri kipenii vody na poverkhnosti s mikro- i nanorelefom [Research of intensification of heat transfer in boiling water on a surface with micro and nano topography]. Teploenergetika. – M.: OOO MAIK «Nauka/Interperiodika», 2014; 3 – 35-38.

16. Shustov M.V. Issledovanie kipeniia v mikrokanale s pokrytiem iz nanochastitc [Research boiling in a microchannel with a coating of nanoparticles]. 01.04.14; 22.04.15; 12.11.15, 2003. – 119 p.
17. Kuzma-Kichta Iu.A., Lavrikov A.V., Stenina N.A. Issledovanie kipeniia pri estestvennoi tcirkuliatcii v trube s relefom iz nanochastitc [Research boiling in a microchannel with a coating of nanoparticles]. Trudy Shestoi Rossiiskoi natsionalnoi konferentsii po teploobmenu. M.: Izdatelskii dom MEI, 2014; 2 – 55-56.
18. Effect of nanopartic leson heat transfer in mini double-pipe heat exchangers in turbulent flow [Text] / Aghayari Reza [and oth.] // Heat MassTransfer, 2015. – № 51. – P. 301- 306.
19. Bardakhanov S.P., Novopashin S.A., Serebriakova M.A. Issledovanie teploprovodnosti nanozhidkosteii na osnove nanochastitc oksida aliuminiia [Study nanofluids thermal conductivity of the alumina nanoparticles]. Nanosistemy: fizika, khimiiia, matematika, 2012; 3(1) – 27-33.
20. Zharov A.V., Savinskii N.G., Pavlov A.A., Evdokimov A.N. Eksperimentalnyi metod izmereniia teploprovodnosti nanozhidkosti [The experimental method of measuring the thermal conductivity of nanofluids]. Fiziko-matematicheskie nauki fundamentalnye issledovaniia, 2014; 8 – 1345-1350.
21. Kutateladze, S.S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of heat transfer theory]. Novosibirsk: Nauka, 1970 – 660 p.
22. Iagov V.V. Nauchnoe nasledie D.A. Labuntcova i sovremennoe predstavlenie o puzyrkovom kipenii [Scientific heritage D.A. Labuntsov and modern idea of nucleate boiling]. Teploenergetika, 1995; 3 – 2-10.
23. Labuntcov, D.A. Fizicheskie osnovy energetiki. Izbrannye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamike [Physical bases of power. Selected works on heat transfer, fluid dynamics, thermodynamics]. M.: MEI, 2000. – 388 p.
24. Овсянник, А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей [Текст] / А.В. Овсянник. – Гомель: ГГТУ им. Г.С. Сухого, 2012. – 284 с.
24. Ovsiannik A.V. Modelirovanie protsessov teploobmena pri kipenii zhidkosteii [Modelling of processes of heat exchange at boiling liquids]. Gomel: GGTU im. G.S. Sukhogo, 2012. – 284 p.
25. Gortyshev Iu.F., Popov I.A., Zubkov N.N. Kipenie vody na mikrostrukturirovannykh poverkhnostiakh [Boiling water on microstructured surfaces]. Trudy Akadenergo, 2012; 1 – 14-31.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЭС

В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов

В статье рассмотрена возможность использования трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения в качестве токоограничивающего устройства при коротких замыканиях в электрических сетях. Описывается математическая дискретная модель трансформаторно-тиристорного устройства ограничения токов КЗ с аналогом микроконтроллерного управления и запирающим полупроводниковых тиристорных ключей как естественной коммутацией, так и искусственным отключением тиристорных ключей внешним устройством (коммутационными приборами). Проведенное математическое моделирование такого модифицированного регулятора напряжения показало, что отключение вентилей внешним устройством позволяет снизить максимальный ток, протекающий в цепи автотрансформатора, до заданного значения. Это достигается путем повышения индуктивного сопротивления трансформатора, вызванного размыканием первичной обмотки. Другой вариант построения такого устройства с запирающим ключей естественным способом (запирание в случае прохождения тока через нуль) неэффективен, вследствие роста тока в течение полупериода до момента отключения вентилей и достижения им критических значений за установленным на входе устройства порогом. Данное устройство и описание дискретной функции управления позволяет использовать полученный программный код и схему силового преобразователя в дальнейшем лабораторном макетировании и моделировании трехфазного варианта устройства

Ключевые слова: моделирование, тиристорный регулятор, короткое замыкание, вольтодобавочный трансформатор, автотрансформатор

Оптимизация режимов ЭЭС с помощью регулирования напряжения, является одним из основных способов повышения эффективности функционирования последних. В качестве аппаратной реализации этого способа широко применяют регулируемые под нагрузкой трансформаторы и автотрансформаторы. Для управления переключением обмоток автотрансформатора с включенным в нейтраль вольтодобавочным трансформатором могут использоваться как полупроводниковые так и механические или газовые переключатели.

Последние не могут обеспечить реализацию современной технологий FACTS. Именно к устройствам второго поколения (FACTS-2) относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой электроники. К этой группе статических устройств можно отнести и вольтодобавочный трансформатор, коммутируемый полупроводниковыми ключами – тиристорами. Такой способ управления позволяет обеспечить снижение кратности перенапряжений и увеличение пропускной способности ЛЭП [1].

В [1,2,3] рассмотрен тиристорный регулятор напряжения с силовым

автотрансформатором, в нейтраль которого включен вольтодобавочный трансформатор (рис. 1), данное техническое решение можно использовать как в режиме вольтоотбавки для подавления перенапряжения в сети при коротком замыкании, так и в «дрессельном режиме» для подавления экстратовков короткого замыкания.

Для определения основных характеристик системы микроконтроллерного управления таким статическим устройством необходимо создать его компьютерную модель.

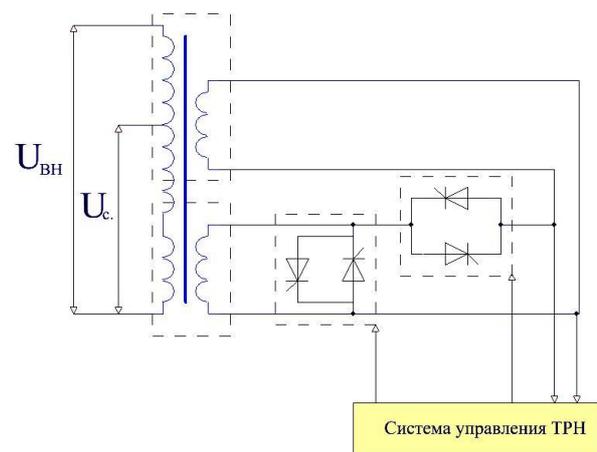


Рис. 1. Трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения

Для моделирования автотрансформатора в пакете Matlab применялся блок Linear Transformer в котором использовались 3 обмотки, а также 2х обмоточный Linear

Крысанов Валерий Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-228-56-06, e-mail: sovteh2000@mail.ru
Шарапов Юрий Викторович – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-434-85-50, e-mail: y.v.sharapov@list.ru

сопротивления
трансформатора.

вольтодобавочного

основе коммутационных элементов и гасящего
резистора представлена на рис. 6.

Модель трансформаторно-тиристорного
регулятора с системой токоограничения на

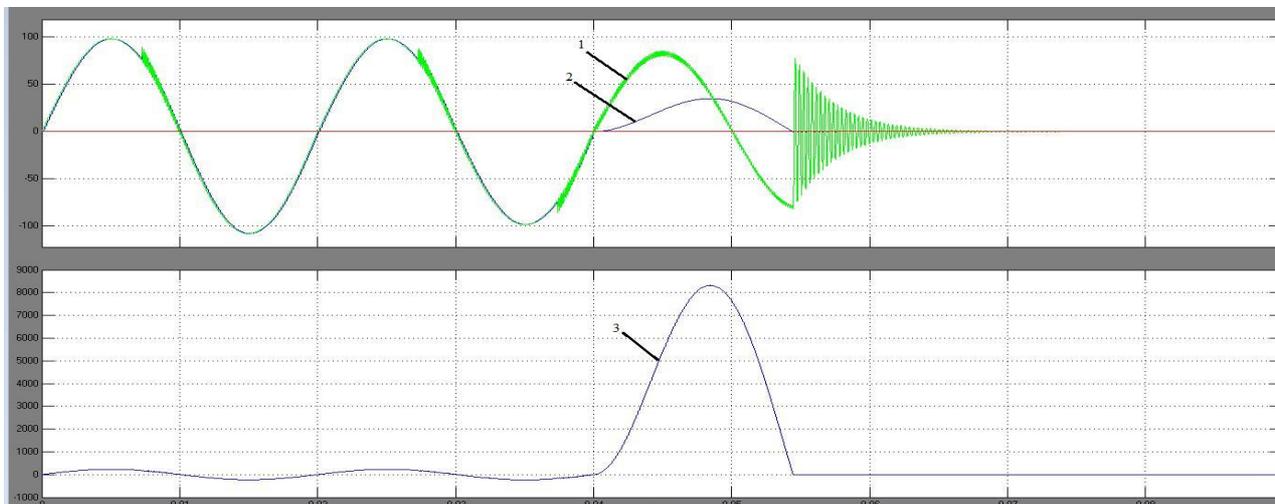


Рис. 4. Переключение ТРН в дроссельный режим с помощью выключения тиристоров 1 – напряжение на выходе трансформатора, 2 – напряжение на нагрузке, 3 – ток на нагрузке

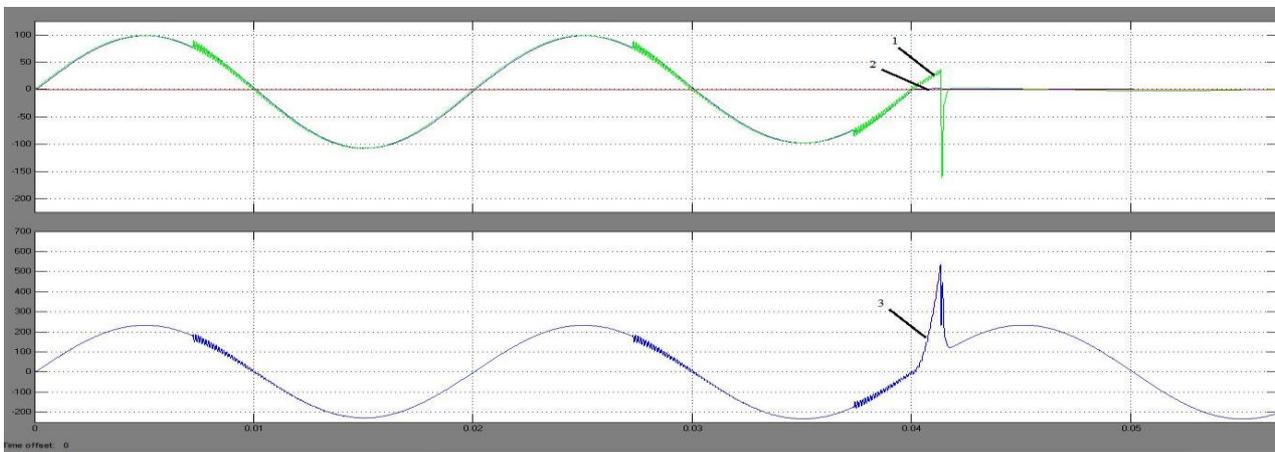


Рис. 5. Переключение ТРН в дроссельный режим с помощью размыкания тиристоров 1 – напряжение на нагрузке, 2 – напряжение на выходе трансформатора, 3 – ток на нагрузке

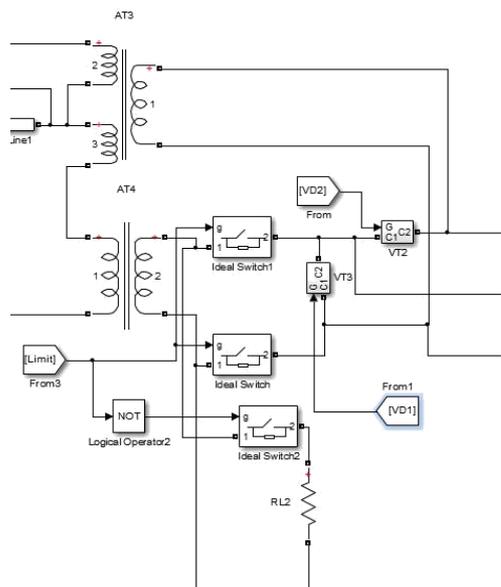


Рис. 6. Тиристорный регулятор с системой токоограничения

Результаты моделирования системы токоограничения показаны на рис. 5.

Как видно из результатов моделирования: применение вольтодобавочного трансформатора в режиме шунтирующего реактора при действии токов короткого замыкания позволяет добиться снижения действующих токов до 1,25 от номинальных, при учете регулирования значения тока отсечки и скорости нарастания тока, за счет применения микроконтроллерной системы управления. При моделировании были учтены как дискретность по времени такой системы управления, так и адекватность смоделированных алгоритмов из соображений переноса их в дальнейшем на лабораторные макеты и стенды для лабораторных занятий.

Воронежский государственный технический университет

COMPUTER SIMULATION OF STATIC SHORT-CURRENT LIMITING DEVICES IN THE POWER SYSTEM

V.N. Krysanov, Candidate of Technical Sciences, Voronezh Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sovtech2000@mail.ru.

Yu.V. Sharapov, Postgraduate, Voronezh Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: y.v.sharapov@list.ru.

Стоит отметить, что моделирование микроконтроллерных (дискретных) систем управления в среде MATLAB на основе блоков Interpreted MATLAB Fcn позволяет добиться не только результатов моделирования с высокой сходимостью с реальными объектами управления, но и добиться скорости написания и отладки программного обеспечения микро-контроллерной системы управления объектом, за счет того что основой текст (в данном случае регулятора напряжения с функцией токоограничения) программы будет аналогичен описанным в функции MATLAB.

Литература

1. Крысанов В.Н. Тиристорный регулятор напряжения как средство повышения пропускной способности и снижения перенапряжения в ЛЭП [Текст] / В.Н. Крысанов // Энергетические комплексы и системы управления. – 2009. - №1. – С. 12-15.
2. Крысанов В.Н. Быстродействующее регулирование напряжения при коротком замыкании в высоковольтных сетях [Текст] / В.Н. Крысанов, С.В. Астафьев // Энергетические комплексы и системы управления. – 2010. - №1. – С. 56-60.
3. Крысанов В.Н. Использование современных микроконтроллерных средств вычисления для управления устройствами «Гибких» систем передачи переменного тока «FACTS» [Текст] / В.Н. Крысанов, Ю.В. Шарапов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. - №3. – С. 62-66.
4. Крысанов В.Н. Учет нелинейности магнитопровода силового трансформатора в статических регуляторах напряжения для энергопотребителей [Текст] / В.Н. Крысанов, А.Б. Кирилов // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2015.- №3 -С.35- 39.

The article discusses the possibility of using the transformer-thyristor voltage regulator as a current-limiting device during short circuits in electrical networks. A mathematical model of discrete transformer-thyristor short-circuit current limiting device with an analog microcontroller control and locking semiconductor thyristor switched keys as a natural and artificial disconnection of thyristor keys External device (switching devices). Conducted by mathematical simulation of the modified voltage regulator shown that gates off the external device reduces the maximum current flowing in the circuit of the autotransformer, to a predetermined value. This is achieved by increasing the resistance of the inductance of the transformer, caused by opening of the primary winding. Another option is the construction of such a device with a locking keys in a natural way (in the case of locking the passage of current through zero) is not effective, due to the current increase during the half-cycle before the shutdown valve and reaches the critical values for the device installed on the input threshold. The resulting device and a description of discrete control function allows you to use the resulting program code and a power converter circuit further laboratory prototyping and modeling of 3-phase version of the device

Key words: modeling, thyristor short circuit, booster transformer, autotransformer

References

1. Krysanov V.N. Tyristornyj regulator napryazheniya kak sredstvo povysheniya propusknoy sposobnosti i snizheniya v LEP [Thyristor voltage regulator as a tool for increasing of carrying capacity and decline of overvoltage in power transmission line], Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya, 2009; №1; 12-15.
2. Krysanov V.N., Astafev S.V. Bystrodeystvuyuschee regulirovanie napryazheniya pri korotkom замыкании в высоковольтных линиях. [Fast-acting regulation of voltage in the time of short current in high-voltage lines]. Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya; 2010 №1; 56-60.
3. Krysanov V.N., Sharapov Y.V. Ispolzovanie sovremennykh microcontrollernykh sredstv vychislenij dlya upravleniya ustroystvami gibkikh system peredachi peremennogo toka [Using modern microcontroller devices of computing for control FACTS system devices]. Energeticheskie komplekсы i sistemy upravleniya; 2014 №3; 62-66.
4. Krysanov V.N., Kirilov A.B. Uchet nelineynosti magnitoprovoda silovogo transformatora v staticheskikh regulatorakh napryazheniya dlya tntrogopotrebitel' [The Accounting of nonlinearly of the magnetic core of power transformer in static voltage regulators for energy consumers] Nauchno-tekhnicheskij zhurnal; Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya; Voronezh; Kvarta; 2015 №3; 35-39.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА УСЛОВНОГО ТОПЛИВА В СИСТЕМЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СВЯЗАННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ПРИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

А.В. Исанова, В.И. Лукьяненко

Рассмотрена система теплоснабжения, состоящая из двух тепловых насосов с последовательно соединёнными испарителями и конденсаторами. Данная схема соединения позволяет достичь такого условия, что температура конденсации максимально приближается к температуре теплоносителя у каждого из тепловых насосов. Определен наиболее благоприятный режим работы станции относительно порядка последовательно соединённых тепловых насосов, на выходе из конденсаторов которых разности между температурами теплоносителя и хладагента различны. Представлены несколько вариантов соотношения параметров приведённой системы: первый случай, когда КПД и конечные разности температур рабочего тела и теплоносителя первого теплового насоса незначительно больше аналогичных значений другого; второй случай, при котором КПД работы первого теплового насоса в большей степени отличается от аналогичного значения другого. На основе математической модели с использованием теории возмущений получены аналитические зависимости температур конденсации рабочих тел тепловых насосов, минимизирующие расход топлива. Используя полученные результаты, можно установить влияние различных параметров тепловой станции, состоящей из тепловых насосов, конденсаторы которых соединены последовательно, а испарители – параллельно, и пиковой котельной, покрывающих нагрузку системы отопления и горячего водоснабжения

Ключевые слова: тепловой насос, система теплоснабжения, хладагент, энергосбережение

Введение. Развитие экономики Российской Федерации характеризуется постоянно возрастающей стоимостью топливно-энергетических ресурсов, меняющимся соотношением цен на энергоносители, ужесточением требований к срокам окупаемости вновь вводимых в эксплуатацию объектов. Поэтому снижение энергоёмкости экономики РФ, в настоящее время, является приоритетной задачей государства. Уменьшение расхода топлива в системах отопления и горячего водоснабжения возможно при внедрении теплонасосных станций, использующих вторичные энергетические ресурсы и возобновляемые источники энергии. А выбор рациональных параметров и режимов работы данных систем позволит добиться большего экономического эффекта.

Согласно принятой в Российской Федерации методике технико-экономических расчетов показателей работы тепловых насосов (ТН) оптимальный вариант выбирался по минимуму приведенных затрат, определяемых для каждого из сравниваемых вариантов. Эта методика связывает выбор того или иного технического решения с экономическим интересом инвестора, ставя этот выбор в зависимость от существующей на данный момент тарифной, ценовой и налоговой политики, таможенного законодательства и других факторов, которые с течением времени могут меняться. В связи с чем в настоящее время нет универсальной, не требующей в каждом конкретном случае адаптации для рассматриваемой задачи методики обоснований эффективности применения ТН, не зависящей от экономической и политической ситуации в стране. Вполне очевидно, что для принятия долгосрочных

технических решений необходимы устойчивые критерии, которые в полной мере отражали бы технико-экономические преимущества предлагаемого варианта [1,2].

Анализ рассматриваемых систем показывает, что инженерные методы оптимизации технико-экономических показателей теплонасосных станций систем теплоснабжения разработаны недостаточно; возможности оптимизации работы, поиска современных энергосберегающих решений далеко не исчерпаны [3,4].

Сокращение расхода топлива в теплонасосных станциях (ТНС) и общая его экономия в системах отопления и горячего водоснабжения зависят, в частности, от температуры нагрева сетевой воды в конденсаторе ТН. В связи с этим возникает задача определения оптимальной температуры конденсации хладагента $T_{к\text{опт}}$ в конденсаторах тепловых насосов. От неё зависит как температура теплоносителя после конденсатора, так и распределение суммарной тепловой нагрузки системы между последовательно соединёнными ТН и пиковым источником теплоты (рис).

Постановка задачи. Существуют различные модификации теплонасосных установок, применяемых в системах отопления и горячего водоснабжения. При последовательном соединении конденсаторов нескольких тепловых насосов у каждого из них температура конденсации максимально приближаются к температуре теплоносителя. Иными словами, каждый последующий цикл располагается в более высоком температурном интервале, чем предыдущий, что позволяет достичь наибольшей температуры теплоносителя на выходе из последнего конденсатора теплового насоса.

Запишем функцию общего расхода условного топлива в безразмерном виде:

Исанова Анна Владимировна – Воронежский ГАСУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-906-677-97-73, e-mail: a.isanova@bk.ru
Лукьяненко Владимир Ильич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-910-249-68-76, e-mail: lukyanenko1@yandex.ru

$$U X, Y \quad B X, Y \left(\frac{2a_1}{a_0 T_{O2} (G_C \quad G_T)} \right)$$

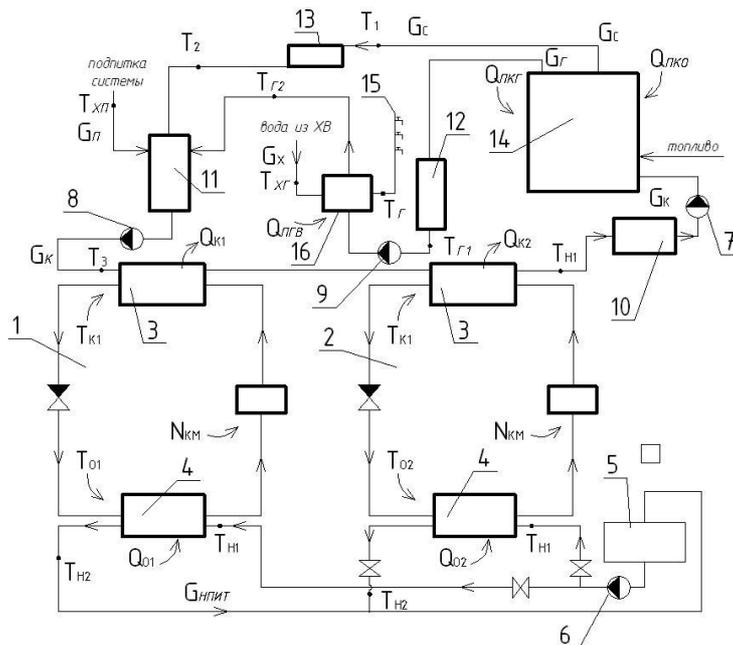
$$A Y \quad O X \quad O_2 / Y \quad 1 \quad O X \quad c_1^* \quad O / X \quad U_0, (1)$$

$$U_0 \quad 2 \quad a_1 \quad G_C \quad c_2 \quad G_T \quad c_3 / K \quad 1$$

$$O \quad 1 \quad c_1^* \quad 1 \quad 2^0, \quad (2)$$

где $X = T_{K1}/T_{O1}$, $Y = T_{K2}/T_{O2}$, $O = T_{O1}/T_{O2}$,
 $a_1 = K^{\ominus} \text{ЭС} / C_H$, $a_0 = 34,1 \cdot 10^6 C_P$,
 $A = 1 - a_1 - 2/K$, $G_C = G_C / (G_C + G_T)$,
 $O_2 = 2/O$, $2 T_{K2} T_{K1}/T_{O2}$,
 $1 - 2 - 1 - 1 - 1 - 1$,
 $c_1 = T_{K1} T_3 / T_{O1}$, $c_2 = T_{K2} T_1 / T_{O2}$, $c_3 = T_{K2} T_{T1} / T_{O2} G_T G_T / (G_C + G_T)$.
 где X, Y – относительная температура конденсации рабочего тела первого и второго теплового насоса; $T_{K1}, T_{K2}, T_{O1}, T_{O2}$ – см. рис. 1; a_1 – произведение КПД всех фрагментов цепи; K – КПД выработки электроэнергии на конденсационных электростанциях (КЭС) ($K (0,32; 0,34)$);
 C_H – коэффициент собственных нужд КЭС

($C_H (0,04; 0,06)$); Э.С. – КПД работы электрической сети ($\text{Э.С.} (0,94; 0,96)$); C_P – удельная изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); A – безразмерный коэффициент связывающий часть внешних и внутренних параметров системы; η_1, η_2 – КПД работы ТН1 и ТН2 соответственно; η_k – КПД работы пиковой котельной ($\eta_k (0,85; 0,9)$); O – отношение температур испарения ТН1 и ТН2 хладагента в конденсаторах ТН1 и ТН2; 2 – относительная разность температур в конденсаторах ТН (2 к температуре испарения хладагента в испарителе ТН); T_{K1} – конечная разность температур в конденсаторе ТН1 и ТН2 соответственно, К; 1 – относительная разность КПД работы ТН1 и ТН2; C_P – удельная изобарная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); G_C – массовые расходы теплоносителя в системе отопления, кг/с; G_C^* – относительные расходы теплоносителя в системе отопления и горячего водоснабжения.



Принципиальная схема теплонасосной станции для систем отопления и горячего водоснабжения:
 1 – тепловой насос ТН1; 2 – тепловой насос ТН2; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5 – низкопотенциальный источник теплоты; 6 – насос в системе НПИТ; 7 – сетевой насос №1; 8 – сетевой насос №2; 9 – насос в системе горячего водоснабжения; 10, 11, 12 – баки-аккумуляторы нагретой в ТН воды, обратной сетевой воды и горячей воды в системе горячего водоснабжения соответственно; 13 – система отопления; 14 – пиковая котельная; 15 – система горячего водоснабжения; 16 – теплообменник системы горячего водоснабжения; Q_0 – тепловая нагрузка испарителя ТН, кВт; $Q_{ПГВ}$ – тепловая нагрузка теплообменника системы горячего водоснабжения, кВт; $G_{НПИТ}$ – массовый расход воды в системе НПИТ, кг/с; G_X – массовый расход холодной воды кг/с; T_0 – температура испарения хладагента ТН, К; $T_{Н1}, T_{Н2}$ – температура НПИТ на входе в испаритель и на выходе из испарителя ТН соответственно, К; T_{K1}, T_{K2} – температура конденсации хладагента ТН1 и ТН2 соответственно, К;
 T_2 – температура теплоносителя в обратном трубопроводе системы отопления, К; $T_{Г1}, T_{Г2}$ – температура теплоносителя до и после теплообменника системы горячего водоснабжения, К; T_G – температура горячей воды в системе горячего водоснабжения (у абонентов), К; $T_{ХП}$ – температура воды, идущей в качестве подпитки в рассматриваемую систему, К; $T_3, T_{ПР}, T_{П}$ – температура теплоносителя до и после конденсатора ТН1 и после конденсатора ТН2 соответственно, К; ХВ – система холодного водоснабжения

На основе математической модели с использованием теории возмущений получены аналитические зависимости температур конденсации рабочих тел тепловых насосов, минимизирующие расход топлива.

В случае, когда КПД и конечные разности температур рабочего тела и теплоносителя первого теплового насоса незначительно больше

аналогичных значений второго $\epsilon_1 \ll 1$ и $\epsilon_2 \ll 1$ ($|\epsilon_1| \ll 1$, $|\epsilon_2| \ll 1$), с точностью до членов второго порядка малости по ϵ_1 и ϵ_2 , имеем:

– температуры конденсации рабочего тела в тепловых насосах, обеспечивающие минимальный расход топлива тепловой станции определяются [5]

$$X_1^2 = \sqrt{\frac{c_1^2}{A}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c_1^2}{A}} + \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \epsilon_1$$

$$Y_1^2 = \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} + \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \epsilon_1$$

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{Ac_1^2}} \sim \dots$$

– минимальное значение функции расхода условного топлива $U_{X,Y}$ составляет

$$U_{X^2, Y^2} = U_0 \frac{A Y_{00}^3 Y_{00}}{2 Y_{00}} - \epsilon_1 \quad (3)$$

где $Y_{00} = \sqrt[3]{c_1^2/A_0^2}$.

В случае, когда КПД первого теплового насоса незначительно больше аналогичного значения второго $\epsilon_1 \ll 1$ и $\epsilon_2 \ll 1$ ($|\epsilon_1| \ll 1$, $|\epsilon_2| \ll 1$), с точностью до членов второго порядка малости по ϵ_1 и ϵ_2 , имеем:

– температуры конденсации рабочего тела в тепловых насосах, обеспечивающие минимальный расход топлива тепловой станции определяются

$$\tilde{X}_1^2 = \sqrt{\frac{c_1^2}{A}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{c_1^2}{A}} + \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \epsilon_1$$

$$\tilde{Y}_1^2 = \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} + \sqrt{\frac{c_1^2}{A^2}} - \epsilon_1$$

$$\frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{Ac_1^2}} \sim \dots$$

– минимальное значение функции расхода условного топлива $U_{X,Y}$ составляет

$$U_{\tilde{X}^2, \tilde{Y}^2} = U_0 \frac{A Y_{00}^3}{3 Y_{00}} - \epsilon_1 \quad (4)$$

Из выражения (3) и (4) можно заключить что, чем выше КПД работы первого теплового насоса, тем меньше энергетические затраты на выполнение работы рассматриваемой системы при оптимальных температурах конденсации рабочих тел в ТН.

Для случая положительной разности КПД второго и первого ТН ($\epsilon_1 > 0$, $\epsilon_2 > 0$), с точностью

– температуры конденсации рабочего тела в тепловых насосах, обеспечивающие минимальный расход топлива тепловой станции определяются

$$X_0^2 = \frac{1}{A} Y_0^2, Y_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{B_k}} Z_0 B_k^*$$

$$Y_1 = \frac{2}{A} \frac{(B_1^*)^3}{Y_0^3}, X_1 = \frac{Y_0^3}{O}$$

$$X_2 = \frac{1}{2A} \frac{B_1^*}{Y_0^3} \sqrt{7} Y_0^3$$

$$X_2 = \frac{O A}{A^2 Y_0^3} \frac{B_1^*}{Y_0^3} \frac{B_1^*}{Y_0^3} \frac{B_1^*}{Y_0^3}$$

$$B_1^* = B_1^3 \frac{1}{c_1^2/A^2}, B_k^* = 2\sqrt[3]{4} \frac{B_1^* K}{K}$$

$$K = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{4}{5} B_1^*}$$

$$Z_0(B_k) = \frac{B_k^*}{4} \frac{1}{1} \sqrt{\frac{1}{B_k^*}}$$

минимальное значение функции расхода условного топлива $U_{X,Y}$ составляет

$$U_{X^*, Y^*} = U_0 \frac{A}{Y_0^2} B_1^* Y_0^3 B_1^* \frac{1}{2} \frac{Y_0}{A}$$

$$\frac{2}{Y_0^3}$$

$$O B_1^* \frac{1}{2} B_1^* \frac{1}{2} \frac{2}{A} \frac{(B_1^*)^3}{Y_0^3}$$

Определим наиболее благоприятный режим работы тепловой станции относительно порядка последовательно соединённых тепловых насосов, на выходе из конденсаторов которых разности между температурами теплоносителя и хладагента различны. Вычислим разность расходов условного

топлива в ТН-цепи при $T_{K2} = T_{K1}$ и $T_{K2} = T_{K1}$:

$$U X^*, Y^*; 2 \quad U X^*, Y^*; 2 \quad 2 \quad 2 \quad \frac{Y_0^{(3)}}{Y_0} \cdot (6)$$

Таким образом, наименьший расход топлива на обеспечение заданного температурного уровня системы будет, если $T_{K2} = T_{K1} = 0$, т.е. величина конечной разности температур между хладагентом и теплоносителем в конденсаторе второго теплового насоса будет больше, чем у первого.

Рассмотрим случай, в соответствии с которым параметр теплопередачи $\tilde{\alpha}_1$, а величина параметра КПД работы $\tilde{\eta}_1$ заключена в интервале $1, 1, 2$, т.е. КПД работы первого теплового насоса больше, чем второго.

Выражения, определяющие оптимальные температуры конденсации хладагентов тепловых насосов, минимизирующие целевую функцию (1), можно записать в виде

$$X^{(3)} = \frac{A}{Y_0^{(3)}} x_1^2 x_2^2, \quad Y^{(3)} = \frac{2}{A_0 Y_0^{(3)}} \frac{3^2 12}{Y_0^{(3)}} \frac{8}{A_0 Y_0^{(3)}} \quad (7)$$

где $x_1 = 1 - \frac{4}{0}$, $x_2 = 2 \frac{A Y_0^{(3)}}{0 c_1} \frac{3}{0} \frac{2}{0}$,

$$0 \frac{Y_0^{(3)} 4 B_1^{*3}}{B_1^{*3}}, \quad 0 \frac{Y_0^{(3)} 4 B_1^{*3}}{B_1^{*3}},$$

$$Y_0^{(3)} \sqrt[4]{\frac{B_1^*}{Q}} \frac{K K}{\sqrt[4]{Q} \sqrt[4]{2 Q}}, \quad X_0^{(3)} = \frac{A}{Y_0^{(3)}} \frac{2}{0}$$

$$Q \sqrt[4]{\frac{B_1^*}{Q}} \frac{K K}{\sqrt[4]{Q} \sqrt[4]{2 Q}}, \quad B_1 \frac{2}{A^2}, \quad K \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{B_1^*}{Q}}} \frac{3}{\sqrt[4]{Q}} \frac{3}{\sqrt[4]{2 Q}}$$

Результаты и выводы. На основе математической модели с использованием теории возмущений получены аналитические зависимости температур конденсации рабочих тел тепловых насосов, минимизирующие расход топлива системы. Используя полученные результаты, можно установить влияние различных параметров тепловой станции, состоящей из тепловых насосов, конденсаторы которых соединены последовательно, а испарители – параллельно, и пиковой котельной, покрывающие нагрузку системы отопления и горячего водоснабжения и обеспечить энергосберегающий режим её работы.

Литература

1. Петраков, Г.Н. Распределение тепловой нагрузки между тепловым насосом и пиковой котельной [Текст] / Г.Н. Петраков, В. Г. Стогней, А. В. Мартынов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Энергетика. – 2004. – Вып. 7.4. – С. 121- 125.
2. Соколов, Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения [Текст] / Е. Я. Соколов, В.М. Бродянский – М.: Энергоиздат, 1981.- 320 с.
3. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст]: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.
4. Везиришвили, О.Ш. Выбор оптимальной мощности теплонасосных установок [Текст] / О.Ш. Везиришвили, В. И. Гомелаури // Теплоэнергетика. – 1982. – №4. – С. 47-50.
5. Кострикин, А.И. Введение в алгебру [Текст] / А.И. Кострикин. – М.: Наука, 1977. – 496с.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
 Воронежский государственный технический университет

THE DEFINITION OF THE FUEL CONSUMPTION IN THE SYSTEM OF SEQUENTIALLY CONNECTED HEAT PUMPS IN ENERGY-EFFICIENT MODE OF OPERATION

A. V. Isanova, Candidate of Technical Sciences, docent, Voronezh state University of architecture and construction, Voronezh, Russian Federation, e-mail: a.isanova@bk.ru

V. I. Lukyanenko, Candidate of Technical Sciences, docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lukyanenko1@yandex.ru

Considered heating system, consisting of two heat pumps with a series-connected evaporators and condensers. This connection scheme allows to achieve the conditions that the temperature of the condensation are very close to the coolant temperature at each heat pump. The most favorable mode of operation of the station relative to the order of series-connected heat pumps, at the outlet of the capacitors which is the difference between the temperatures of the coolant and refrigerant are different. Given several options for the ratio of the parameters of the system. The first time that the efficiency and the finite temperature difference between working fluid and the coolant of the first heat pump slightly more than the same values of the other. The second case in which the efficiency of the first heat pump to a greater extent differs from the value of another. On the basis of the mathematical model with the use of perturbation theory analytical dependences of the temperatures of condensation of working fluids heat pumps that minimize fuel consumption. Using results, it is possible to determine the influence of various parameters in a thermal power plant, consisting of heat pumps,

condensers which are connected in series, and evaporators in parallel, and the peak boiler to cover the load of heating and hot water supply

Key words: heat pump, heating system, refrigerant, energy saving

References

1. Petrakov G.N., Stognej V. G., Martynov A. V. Raspredelenie teplovoj nagruzki mezhdru teplovym nasosom i pikovoj kotel'noj [The distribution of heat load between a heat pump and peak boiler]. Vestnik Voronezh. gos. tehn. un-ta. Ser. Jenergetika. 2004. Vyp. 7.4. P. 121- 125.
2. Sokolov E. Ja., Brodjanskij V.M. Jenergeticheskie osnovy transformacii tepla i processov ohlazhdenija [Energy basis of transformation of heat and cooling processes]. Moscow. Jenergoizdat. 1981. 320 p.
3. Sokolov E. Ja. Teplofikacija i teplovyje seti [District heating and heat networks]. Moscow. Izdatel'stvo MJeI, 1999. 472 p.
4. Vezirishvili O.Sh., V. I. Gomelaur Vybor optimal'noj moshhnosti teplonasosnyh ustanovok [The choice of optimum capacity of heat pump installations]. Teplojenergetika. 1982. №4. P. 47-50.
5. Kostrikin A.I. Vvedenie v algebru [Introduction to algebra]. Moscow. Nauka. 1977. 496 p.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков

В статье рассматриваются вопросы повышения точности прогнозирования уровня потребления региональной электроэнергетической системы. Проанализирована функциональная зависимость между отдельными её частями и выявлены наиболее существенные взаимосвязи, позволяющие получить полную и удобную в работе математическую модель анализируемого процесса транспорта электрической энергии. Подробно описываются процесс формирования предварительного диспетчерского графика и значимость повышения его точности. Отмечены основные экономические стимулы повышения точности прогнозирования выработки и потребления электрической энергии в региональной системе. В частности, детально показана взаимосвязь мероприятий, проводимых администратором торговой сети, а также системным оператором единой энергетической системы. Описаны этапы создания элементов программного комплекса, предназначенного для повышения точностных характеристик предварительного диспетчерского графика. Их реализация организована посредством применения многофункционального языка программирования - C#. В процессе написания программного продукта был использован интерфейс Windows Forms, позволяющий разрабатывать интеллектуальные клиенты - приложения с развитым графическим функционалом. Описаны как классическая структура прогнозирования, так и алгоритмы, реализующие аппарат нейронных нечётких сетей (на базе алгоритма Мамдани) в рамках разработанного программного обеспечения для решения поставленных задач в элементах единой энергетической системы

Ключевые слова: электроэнергетическая система, повышение точности прогнозирования, алгоритмы оптимизации, программный комплекс

Управление элементами региональных электроэнергетических сетей (ЭЭС) является базовым с точки зрения обеспечения надёжности снабжения электрической энергией конечных потребителей. Кроме того, следует отметить, что от качества реализации данного этапа

напрямую зависят возможности дальнейшей интеграции локального звена в единую электроэнергетическую систему (ЕЭС) [1].

Обобщённая структурная схема управления региональной ЭЭС приведена на рис. 1.

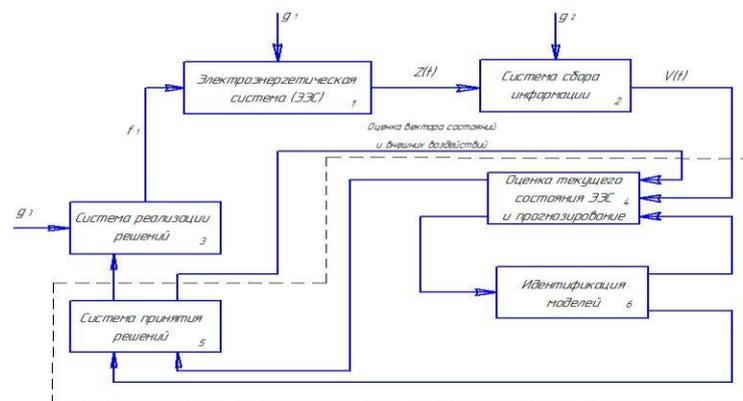


Рис. 1. Структурная схема управления региональной ЭЭС ($Z(t)$ – вектор состояния ЭЭС; $V(t)$ – вектор измерений ЭЭС; g_1, g_2, g_3 – возмущающие воздействия на различных этапах управления; f_1 – главное управляющее воздействие)

Бурковский Виктор Леонидович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Крысанов Валерий Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-228-56-06, e-mail: sovteh2000@mail.ru

Руцков Алексей Леонидович - ВГТУ, аспирант, тел. 8-952-540-98-89, e-mail: alex_8_90@mail.ru

В соответствии с этой схемой можно выделить следующие существенные структуры:

- 1) ЭЭС – совокупность элементов генерации, транспорта и потребления э/э (без элементов управления) – главный объект управления;
- 2) Система сбора информации (к примеру, АИИС КУЭ) – элементы учёта и регистрации потребления электроэнергии, мощности и иных параметров в структуре ЭЭС;
- 3) Система реализации решений – средства регулирования ЭЭС (исполнительные механизмы генераторов, трансформаторов, коммутационная аппаратура);
- 4) Система оценки текущего состояния и прогнозирования ЭЭС;
- 5) Система принятия решений;
- 6) Система математических моделей функционирования ЭЭС [2].

Блоки 4 – 6 можно обобщённо представить единой системой управления (СУ). Вектор основного управляющего воздействия формируется системой принятия решений – 5 на основании взаимного функционирования блоков 4 и 6.

Основной целью СУ региональной ЭЭС является оптимизация как самих алгоритмов управления, так и существующих подструктур, применяемых в рамках данных моделей в условиях развивающихся региональных систем электроснабжения.

Для решения этой задачи первоочередным видится анализ и синтез блоков оценки текущего состояния и прогнозирования ЭЭС (блок 4) и системы принятия решений (блок 5). Этот выбор обусловлен первостепенной значимостью выполнения данных этапов в общей структуре функционирования ЭЭС и выражается в следующих причинах:

– необходимостью прогнозирования параметров электроэнергетической системы как основы для выработки последующих управляющих воздействий;

– нормативно закреплённым аспектам функционирования ЕЭС РФ на современном этапе развития;

– стремлению к минимизации затрат на производство, преобразование и потребление электрической энергии;

– экономические требования смежных областей производства.

Основной целью этапа оценки текущего состояния и прогнозирования ЭЭС является выработка такой модели функционирования, параметры которой будут наиболее точно и полно коррелироваться с аналогичными показателями объекта управления в одинаковые дискреты времени. При этом, наиболее сложными являются задачи прогнозирования в краткосрочном и долгосрочных периодах, что связано с существенным влиянием неопределённых и слабоформализуемых факторов (зависимости потребления электроэнергии от часа, дня недели, сезонности, освещённости, планов производственных мощностей).

Степень точности и оперативности при решении задач на этапе принятия решений напрямую влияют на качество реализации расчётных моделей применительно к реальным объектам ЭЭС.

Рассмотрим подробно процесс прогнозирования потребления электрической энергии в рамках регионального звена ЕЭС.

Как отмечено в [3], процесс диспетчерского управления можно представить в виде трёх взаимосвязанных этапов: создание предварительной модели ЭЭС; оптимизация и актуализация; расчёт модели ЭЭС (рис.2).

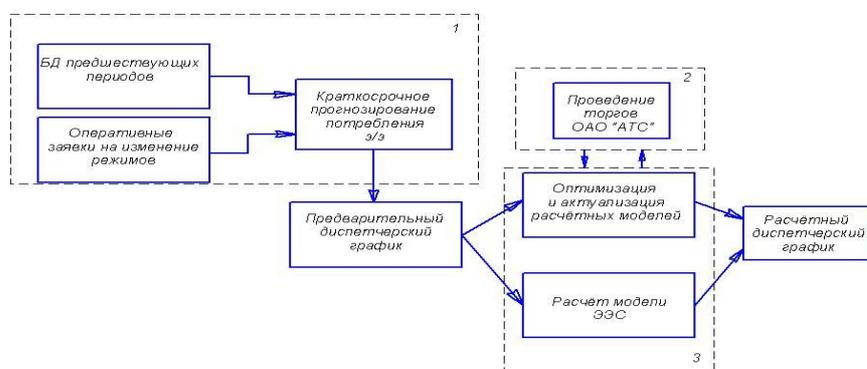


Рис. 2. Обобщённая схема взаимосвязи процесса прогнозирования потребления э/э с другими элементами при составлении расчётного диспетчерского графика (блок 1 – «прогноз»; блок 2 – «торги на рынке э/э»; блок 3 – «методы и модели расчёта ЭЭС»)

На первой стадии создаётся диспетчерский график участников ОРЭМ с почасовой детализацией и учётом их договорных обязательств. Вместе с тем, протекает процесс прогнозирования (в том числе и корректировки прогноза) потребления э/э, определяются отклонения складывающихся инициатив от планового значения. Исходными данными для этого является информация, представляемая в РДУ и ОДУ участниками ОРЭМ:

- объёмные заявки потребления электроэнергии;

- мощность и диапазон её возможного изменения для готового к работе генерирующего оборудования

- технические ограничения по скорости набора и снижения нагрузки на генерирующем оборудовании электрических станций.

В рамках блока «прогноз», на различных иерархических уровнях – от РДУ, через ОДУ, до верхнего звена управления СО – собирается информация о прошлом и текущем состоянии потребителей и формируется краткосрочные (от часа до месяца) прогнозные зависимости. При взаимодействии ОДУ и РДУ осуществляется выбор состава необходимого генерирующего оборудования для удовлетворения прогнозируемого максимума нагрузки с учётом резерва. После выбора структуры генерирующего оборудования производится расчёт распределения активной мощности с учётом БД по потребителям э/э – формирование предварительного диспетчерского графика (ПДГ).

ПДГ является начальной моделью для последующей оптимизации структуры и функционирования ЭЭС. На данном этапе – блок 3 на рис.2 – производится выбор наилучшего распределения параметров в узлах нагрузки за конечное время для принятия решений.

Параллельно с этим процессом осуществляются торги на ОРЭМ посредством функционирования ОАО «АТС». На основе сопоставления базовых договорных и заявленных суточных обязательств участников рынка и полученных в соответствии с предварительным диспетчерским графиком значений сальдо-перетоков, выработки и потребления электроэнергии за сутки осуществляют классификацию предварительных инициатив в отклонениях поставок электроэнергии участников рынка и СО.

Далее производятся непосредственные ежесуточные аукционы электроэнергии на конкурентном секторе рынка, на каждый час торгуемых суток «Х» производится синтез и актуализация расчетной модели ЭЭС.

Как следует из анализа рис.2, важнейшее место при формировании ПДГ имеет точность прогнозирования выработки и потребления электрической энергии в рамках региональной ЭЭС. С этой целью был проведён этап реализации программно-алгоритмического комплекса на базе нечёткой нейронной сети, построенной по правилам Мамдани.

Помимо вышеописанных причин, разработка информационной системы, обеспечивающей точное прогнозирование графиков нагрузки электроэнергетических систем, актуальна благодаря тому, что предоставляет уникальную возможность смоделировать ситуацию, которая теоретически может возникнуть. С помощью такой искусственно созданной ситуации алгоритм прогноза позволит оценить возможные последствия, а значит, и заложить средства для качественного и своевременного управления этими последствиями [4].

В качестве языка программирования для написания проекта информационной системы прогнозирования был выбран простой и многофункциональный C#, как один из наиболее популярных среди существующих объектно-ориентированных средств программирования. C# полностью базируется на объектно-ориентированных принципах, что очень удобно при разработке сложных комплексных программ.

Язык C# и связанную с ним среду .NET Framework можно отнести к одним из наиболее значительных среди всех предлагаемых в настоящее время технологий для разработчиков программного обеспечения. Среда .NET была создана для разработки широкого спектра приложений с возможностью запуска в операционной системе Windows. Стоит отметить, что применение C# и .NET Framework предоставляет возможность создавать: динамические веб-страницы; веб-службы XML; приложения Windows Presentation Foundation; компоненты для разнообразных распределённых приложений, в том числе, реализующие доступ к базам данных; клиентские приложения сверхнового интеллектуального типа, обладающие уникальными возможностями для работы в оперативном и автономном режимах.

В процессе написания программного продукта был также использован интерфейс Windows Forms, позволяющий разрабатывать интеллектуальные клиенты, то есть приложения с развитым графическим функционалом, простые в развертывании и обновлении, способные работать как при наличии, так и в отсутствии подключения к Интернету и исполь-

зующие максимально безопасный доступ к предоставляемым ресурсам на локальном компьютере. Выбранная технология реализации программного обеспечения представляет собой набор управляемых библиотек, которые в значительной мере упрощают выполнение стандартных задач и операций, таких как чтение из файловой системы и запись в нее.

С помощью среды разработки типа Visual Studio было создано интеллектуальное клиентское приложения Windows Forms (элемент программного комплекса по прогнозированию уровня регионального энергопотребления), функционирующего на основе информации от

пользователей и собственных баз данных согласно реализованным внутри программы алгоритмам.

Главная форма (представлена на рис. 3) служит для заполнения пользователем информации о фактических данных величины потребления электроэнергии за предшествующие периоды. Для работы алгоритма прогнозирования предусмотрено несколько вариантов временных интервалов, различающихся по длительности: данные для определенного месяца, которые необходимо заполнить по дням (суточное потребление), для года – по месяцам, для недели – по часам.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- At the top, a section titled "Интервал заполнения данных:" (Data filling interval) contains a dropdown menu set to "Неделя (по часам)" (Week (by hour)), a "Вести данные" (Enter data) button, a "Загрузить таблицу" (Load table) button, a text input field "Укажите файл" (Specify file), and a "Перейти к прогнозу" (Go to forecast) button.
- Below this, a section "Интервал для ввода данных:" (Data input interval) includes a dropdown for "Понедельник" (Monday), a "Число" (Number) dropdown, a separator "--", another "Число" (Number) dropdown, a "Месяц" (Month) dropdown, and a "Год" (Year) dropdown.
- At the bottom, there is a table with 8 columns: "Час" (Hour), "Понедельник" (Monday), "Вторник" (Tuesday), "Среда" (Wednesday), "Четверг" (Thursday), "Пятница" (Friday), "Суббота" (Saturday), and "Воскресенье" (Sunday). The table body is currently empty and highlighted in blue.

Рис. 3. Главная форма пользовательского интерфейса

У пользователя есть возможность заполнить данные вручную либо загрузить их из таблицы excel. Загруженная таблица с данными отобразится на форме и пользователь, при необходимости, сможет отредактировать находящиеся в ней данные.

Стоит отметить, что пользователь может не заполнять все представленные для выбора интервалы, а указать данные только для интересующего его интервала.

После того, как все данные будут заполнены, по кнопке «Перейти к прогнозу» осуществляется переход на вторую форму, на которой впоследствии будут построены графики сделанных прогнозов и предоставлена возможность выгрузки спрогнозированных данных в табличном виде. Внешний вид второй формы представлен на рис.4.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- On the left, a section "Укажите интервал прогноза:" (Specify forecast interval) has a dropdown menu.
- In the center, under "Данные для расчетов" (Data for calculations), there are two buttons: "Заполнить данные для классического прогнозирования" (Fill data for classical forecasting) and "Заполнить данные для нейро-нечеткого прогнозирования" (Fill data for neuro-fuzzy forecasting).
- To the right, there is a checkbox "Сравнить прогноз с реальными значениями" (Compare forecast with real values).
- At the bottom left, there is a "Построить график прогноза" (Build forecast graph) button.
- At the bottom center, there is a "Выгрузить прогнозируемые значения в виде таблицы" (Export forecasted values as table) button.
- On the right, under "Справочная информация:" (Reference information), there are two buttons: "Подробная информация о классическом прогнозировании" (Detailed information about classical forecasting) and "Подробная информация о нейро-нечетком прогнозировании" (Detailed information about neuro-fuzzy forecasting).

Рис.4. Внешний вид оконной формы

Выгрузка спрогнозированных данных (в табличном виде и в виде графика) реализуется для конкретного интервала (неделя, месяц, год).

Выбрать необходимый интервал можно из выпадающего списка, расположенного в левой верхней части формы.

Включенная функция «Сравнить прогноз с реальными значениями» предоставляет возможность на графическом компоненте вывести совмещенные графики исходных и реальных значений. Также в данной форме сконцентрированы кнопки перехода к дополнительным формам.

В правой части формы расположены кнопки для ознакомления со справочной информацией об используемых алгоритмах прогнозирования. Внешний вид формы, посвященной

функционированию моделей прогнозирования генерации/потребления электроэнергии при помощи коэффициента роста/спада спроса на ОРЭМ, представлен на рис.5.

На рис. 6 отображен внешний вид формы со справочной информацией о нейро-нечетком прогнозировании.

Возврат к главной форме осуществляется по нажатию кнопки «Ок».

Функционирование моделей прогнозирования генерации/потребления электроэнергии при помощи коэффициента роста/спада спроса на ОРЭМ Ок

Годовой, месячный и недельный прогнозы потребления электроэнергии строятся, исходя из значений среднего за десять лет выборки и с учетом коэффициента роста/спада потребления в текущем году. (Например, для 2014 года был принят коэффициент роста $k_p = 1.065$). Данная величина является прогнозом экономической активности в отрасли и означает тенденцию к увеличению/уменьшению потребления электроэнергии относительно среднего значения выборки. Помимо этого учитывается влияние фактора температуры окружающей среды.

Прогнозные значения потребления электроэнергии вычисляются с помощью формулы:

$$X_k = (k_p \pm k_t \cdot \Delta C) \cdot X_{ks}$$

где:

- k_p - коэффициент роста/спада
- X_k - величина прогнозируемого потребления
- X_{ks} - величина среднего потребления за года выборки
- C - отклонения температуры для периодов прогноза от нормы

Рис. 5. Прогнозирование при помощи коэффициента роста/спада спроса

Основной элемент искусственной нейронной сети - формальный нейрон. Ок

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b$$

$$y = f(s)$$

где:

- n - число входов нейрона
- x - входной сигнал
- w - веса нейрона
- b - значение смещения
- s - результат суммирования
- f - нелинейное преобразование
- y - выходной сигнал

Нейро-нечеткая сеть - это нейронная сеть с четкими сигналами, весами и активационной функцией, с объединением X и W с использованием непрерывных операций, а также применением гладких функций принадлежности.

Нечеткая логическая переменная может быть описана тройкой параметров $\langle a, X, A \rangle$, где:

- a - имя нечеткой переменной;
- X - универсальное множество, на котором заданы значения переменной a ;
- A - нечеткое подмножество универсального множества X , для каждого элемента которого определена функция $m(x)$, задающая степень принадлежности данного элемента к множеству A .

Система нечетких рассуждений:

Вход (Численный) → [Блок фазификации] → [База данных / База правил] → [Блок принятия решений] → [Блок дефазификации] → Выход (Численный)

- блок фазификации, преобразующий численные входные значения в степени соответствия лингвистическим переменным;
- база правил, содержащая набор нечетких правил типа «Если - То»;
- база данных, в которой определены функции принадлежности нечетких множеств, используемых в нечетких правилах;
- блок принятия решений, совершающий операции вывода на основании имеющихся правил;
- блок дефазификации, преобразующий результаты вывода в численные значения.

Алгоритм формирования модели прогнозирования потребления и генерации потребления электроэнергии

Пример структуры нейро-нечеткой сети

Блок - схема алгоритма обучения нейро-нечеткой сети

Рис. 6. Справочная информация о системе нейро-нечетком прогнозировании

На форме со справкой о нейро-нечетком прогнозировании расположены кнопки, которые открывают дополнительные окна, чтобы пользователь мог ознакомиться с алгоритмом формирования модели (к примеру структурой нейро-нечеткой сети, используемой при прогнозировании –рис. 7).



Рис. 7. Информационное окно

Также на второй форме расположены кнопки перехода к вкладкам, на которых пользователю необходимо заполнить информацию о параметрах, на основе которых алгоритм строит прогноз. Для каждого: классического (показана на рис. 8) и нейро-нечеткого прогнозирования (показана на рис. 9) реализована отдельная форма.

Для формы, на которой пользователь вводит параметры, необходимые для классического прогнозирования, предусмотрена возможность ввода данных в виде таблицы. Загрузить таблицу с данными можно по кнопке «Загрузить таблицу», предварительно указав путь к файлу.

Рис. 8. Исходные данные для классического метода прогнозирования

Данный интерфейс позволяет пользователю в удобной и понятной форме редактировать данные и в конечном итоге получать спрогнозированные данные, а при необходимости зна-

комиться со справочной информацией о используемом алгоритме.

Рис. 9. Исходные данные для нейро-нечёткого метода прогнозирования

Используемый подход к разработке программного продукта, реализующего прогнозирование электрических нагрузок электроэнергетических систем, обеспечивает эффективный результат и может быть распространен на многие другие задачи прогнозирования в области управления производством.

Область применения разработанного программного продукта достаточно широка и позволяет с минимальными доработками адаптировать работу алгоритма к различным задачам прогнозирования.

Литература

1. Бурковский, В.Л. Модели оптимального энерго-распределения в системах регионального энергопотребления [Текст] / В.Л. Бурковский, Р.А. Харченко. – Воронеж: ВГТУ, 2006 – 137с.
2. Крысанов, В.Н. Особенности реализации технологии Smart Grid в региональных системах электроснабжения [Текст] / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т.10 – № 5-1. – С. 92-97.
3. Модель прогнозирования регионального потребления на базе нечёткой нейронной сети [Текст] / В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т.11 – № 5. – С. 41-46.
4. Проблемы и решения при внедрении Smart Grid в России [Текст] / В.Н. Крысанов, В.Л. Бурковский, А.Л. Руцков, Ю.В. Шарапов // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМУКТ-15) сборник трудов VIII международной конференции. 2015. С.189-191.

Воронежский государственный технический университет

SALES PROGRAM COMPLEX PREDICTION OF THE REGIONAL LEVEL OF ENERGY CONSUMPTION

V.L. Burkovsky, Doctor of Technical Sciences , Professor , Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bvl@vorstu.ru

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

A.L. Rutskov, Postgraduates, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: alex_8_90@mail.ru

The article deals with improving the accuracy of prediction of the level of consumption of the regional power system . Analyzed the functional relationship between the individual parts of it and revealed the most significant relationship, provides a complete and easy to use a mathematical model of the process being analyzed transport of electrical energy. It described in detail the process of forming the dispatching schedule and the importance of improving its accuracy. Noted the basic economic incentives improve the accuracy of forecasting production and consumption of electric energy in the regional system. The interrelation of activities carried out by the administrator of trading network and system operator of the unified energy system. We describe the steps of creating the elements software package designed to increase the accuracy characteristics of the dispatch schedule. Their implementation is organized through the use of multi-functional programming language - C #. In the process of writing software Windows Forms interface was used, allowing to develop smart clients - applications with advanced graphical functionality. Described as a classic structure prediction , and algorithms that implement the apparatus of fuzzy neural networks (based on Mamdani algorithm) within the software developed for the task in the elements of the Unified Energy System

Key words : power system , improve the accuracy of forecasting , optimization algorithms , software package

References

1. Burkovsky V.L., Kharchenko R.A. Modeli optimal'nogo ehnergoraspredeleniya v sistemah regional'nogo ehnergopotrebleniya [Models of optimal power distribution systems of regional energy]. Voronezh: V G TU, 2006. 137 p.
2. Krysanov V.N., Ruckov A.L., Shukur Omar Shukur Mahmud Osobennosti realizacii tekhnologii Smart Grid v regional'nyh sistemah ehlektrosnabzheniya [Features of the implementation of Smart Grid technology in the regional power supply systems]. Bulletin of Voronezh State Technical University. Voronezh, 2013. – T.10 – № 5-1; 92-97.
3. Burkovskij V.L., Krysanov V.N., Ruckov A.L., Shukur Omar Shukur Mahmud. Model' prognozirovaniya regional'nogo potrebleniya na baze nechyotkoj nejronnoj seti [Model prediction of regional consumption based on fuzzy neural network]. Bulletin of Voronezh State Technical University. Voronezh, 2015. – T.11 – № 5; 41-46.
4. Krysanov V.N., Burkovskij V.L., Ruckov A.L., Sharapov Yu.V. Problemy i resheniya pri vnedrenii Smart Grid v Rossii [Problems and solutions in the implementation of Smart Grid in Russia] // Sovremennye metody prikladnoj matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternyh tekhnologij (PMUKT-15) sbornik trudov VIII mezhdunarodnoj konferencii [Modern techniques of applied mathematics , control theory and computer technology Proceedings of VIII International Conference]. Voronezh, 2015; 189-191.

ВХОДНОЙ ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ КМОП-КОМПАРАТОРОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С НИЗКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ

В.С. Кононов

Проведен анализ входного диапазона синфазных напряжений и переходных характеристик наиболее известных полномасштабных усилителей. Установлено, что при низких напряжениях питания $1,8 \text{ В} \pm 5\%$ и типовых пороговых напряжениях около $0,9 \text{ В}$ входной диапазон составляет всего $0,9\text{-}1,3 \text{ В}$ в зависимости от типа усилителя. Показано, что полномасштабные усилители на основе двух дифференциальных пар РМОП и NМОП транзисторов фактически не имеют внутреннего участка шкалы с одинаковой переходной характеристикой, на котором РМОП и NМОП транзисторы одновременно активны. В полномасштабных усилителях другого типа с одной дифференциальной парой внутренний участок шкалы составляет около 400 мВ , что достигнуто ценой ухудшения входного сопротивления. В статье рассматривается новый полномасштабный усилитель с входным диапазоном, равным напряжению питания, и высоким входным сопротивлением. Предложено два варианта усилителя, которые отличаются наличием нейтрализатора помех в одном из этих вариантов. Усилители предназначены для использования при создании низковольтных компараторов и ОУ

Ключевые слова: КМОП, усилитель, диапазон, компаратор, ОУ

Входной диапазон синфазных напряжений (шкала) в большинстве современных низковольтных КМОП-компараторов и операционных усилителей (ОУ) с однополярным питанием обычно меньше напряжения питания, что в ряде случаев создает проблемы при проектировании таких изделий. Одним из таких случаев является двухсекционный безконденсаторный 12-разрядный КМОП-АЦП со складывающейся архитектурой (по английски – folding), напряжением питания $1,8 \text{ В} \pm 5\%$ и частотой преобразования 1 ГГц (рис. 1). В этом АЦП с 24 компараторами на входе каждой секции и ОУ на выходе 1 секции (на рис. 1 не показаны) при типичном коэффициенте усиления ОУ $K_v \approx 4$ входная шкала 1 секции, как нетрудно вычислить, должна составлять около $1,6 \text{ В}$, что близко к минимальному напряжению питания $1,71 \text{ В}$.



Рис.1. Блок-схема 12-разрядного КМОП-АЦП:
АС – аналоговый сигнал; ЦС – цифровой сигнал

Понятно, что при таких условиях на входе 1 секции невозможно использовать не только обычные дифференциальные усилители, но и известные, так называемые, полномасштабные (по английски – rail-to-rail) каскады, как, например, каскад, показанный на рис. 2 [1]. Недостатки «полномасштабных» каскадов хорошо известны. Они характеризуются ухудшением линейности на краях входной шкалы, когда происходит резкое замедление переходной характеристики при переходе из внутренней части шкалы, в которой РМОП- и NМОП-транзисторы одновременно активны. Для высокочастотных каскадов типа (рис. 2) внутренняя часть шкалы отстоит от напряжения питания и «земли» примерно на U_0 . Здесь U_0 – абсолютное значение пороговых напряжений РМОП- и NМОП-транзисторов. Отсюда следует, что при $U_{\Pi} = 1,8 \text{ В}$ и $U_0 \approx 0,9 \text{ В}$ внутренняя часть шкалы фактически отсутствует.

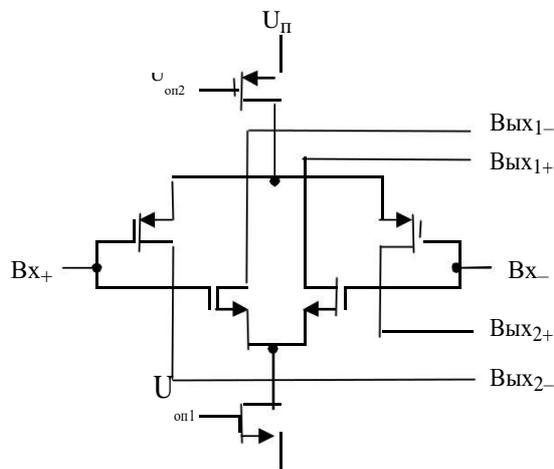


Рис. 2. Типовой «полномасштабный» каскад

В каскаде, показанном на рис. 3 [2], обеспечивается некоторое расширение внутреннего участка шкалы за счет использования внутреннего ОУ на основе 4 МОП-транзисторов с общим истоком. Однако достигнутый таким образом выигрыш на практике не превышает ~ 200 мВ для каждого края шкалы.

Кроме того, как видно из рис. 3, входные цепи каскада содержат последовательно соединенные резисторы и МОП-транзисторы обоих типов. При таком подходе трудно обеспечить высокое входное сопротивление, которое необходимо для хорошего согласования этого каскада с другими схемами.

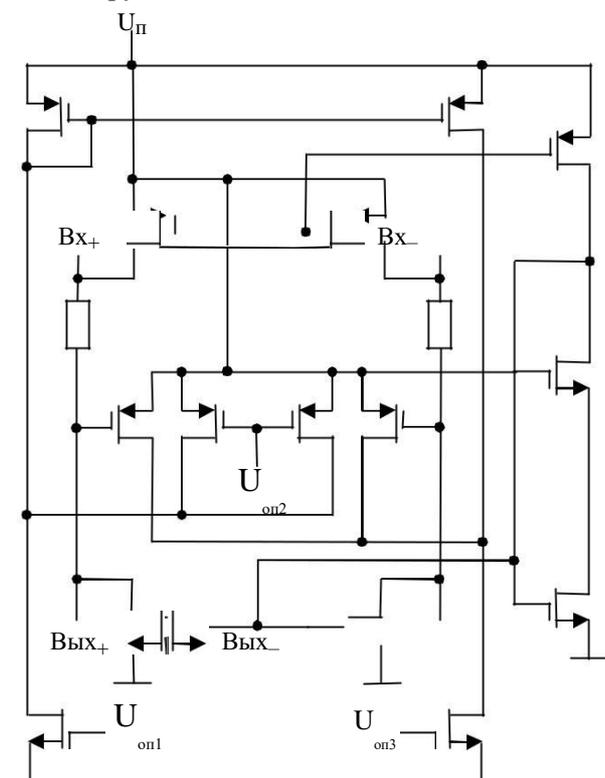


Рис. 3. Полномасштабный каскад с расширенной шкалой

Целью данной статьи является создание истинно полномасштабного усилительного каскада, свободного от недостатков каскадов (рис. 2, 3).

Наилучшим решением является истинно полномасштабный усилитель (рис. 4).

Как видно из этого рисунка, в каждом плече усилителя используются две пары РМОП- и НМОП-транзисторов, одни из которых соединены с входами V_{x+} , V_{x-} , а другие – с входом $V_{x_{сн}}$. Такое соединение транзисторов позволяет плавно перераспределять токи между транзисторами в каждой паре при изменении входных напряжений от 0 до $U_{п}$. Когда один из транзисторов отсекается, например, РМОП-

транзистор в верхней паре левого плеча усилителя при $U_{п} - U_{V_{x+}} < U_0$, другой транзистор из этой пары «забирает» на себя весь ток, протекающий в левом плече при $U_{V_{x+}} > U_{п} - U_0$. Аналогичным образом происходит перераспределение тока между нижними НМОП-транзисторами при $U_{V_{x+}} < U_0$.

Благодаря плавному перераспределению токов переходная характеристика усилителя (рис. 4) сохраняется практически одинаковой на всех участках шкалы, где оба транзистора, подключенные к входу V_{x+} или V_{x-} , активны или активен только один из них.

Несмотря на очевидные достоинства, усилитель (рис. 4) имеет один недостаток, который не позволяет обеспечивать подавление входных помех как это осуществляет обычный дифференциальный усилитель. В самом деле, если посмотреть на электрическую схему (рис. 4), то можно увидеть, что предложенный усилитель фактически представляет собой комбинацию двух инвертирующих усилителей, практически автономных по отношению друг к другу.

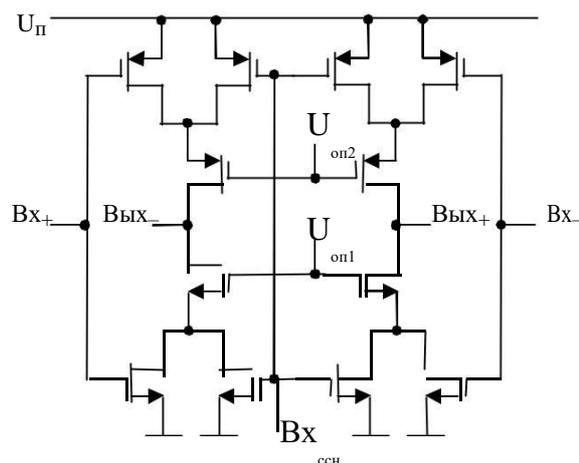


Рис. 4. Электрическая схема истинно полномасштабного усилителя:

$V_{x_{сн}}$ – вход стабилизации синфазного напряжения на выходе усилителя

Для устранения отмеченного недостатка такой усилитель целесообразно использовать совместно с дифференциальным усилителем на его выходе, который будет выполнять функцию нейтрализатора помех и, при необходимости, обеспечивать дополнительное усиление полезного сигнала (рис. 5).

Как показали исследования, общее усиление двухкаскадного усилителя (рис. 5) без обратной связи может достигать 20-36 дБ при использовании транзисторов с минимальной длиной каналов 0,18-0,2 мкм. В этом случае полоса частот единичного усиления составляет около 1,8-2,2 ГГц. При увеличении длины каналов в

2-3 раза усиление возрастает до 40-80 дБ, что, одновременно, приводит к уменьшению полосы единичного усиления практически во столько же раз.

Выводы.

1. Предложенный усилитель имеет истинно полномасштабную шкалу и линейную переходную характеристику, благодаря плавному перераспределению токов между транзисторами. Однако прямое использование усилителя не

обеспечивает подавление внешних помех.

2. Для подавления внешних помех предложенный усилитель целесообразно использовать совместно с обычным дифференциальным усилителем на его выходе, добавление которого приводит к образованию полноценного двухкаскадного усилителя с истинно полномасштабным входом.

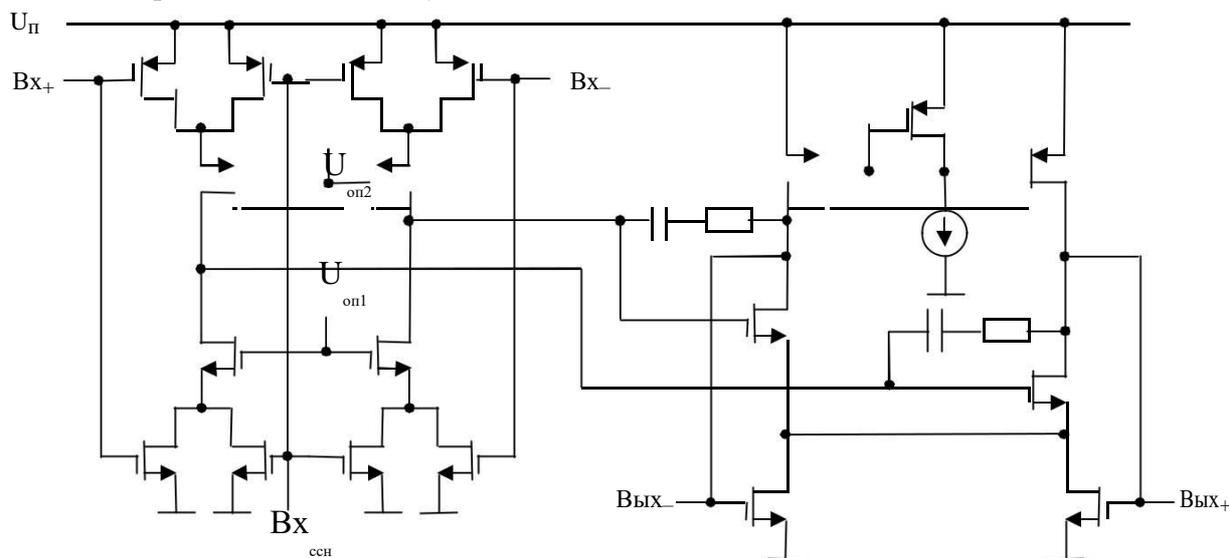


Рис. 5. Двухкаскадный усилитель с входным истинно полномасштабным каскадом

Литература

1. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование [Текст] : монография / У. Кестер; пер. с англ. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.

2. Duque-Carrillo J.F. 1-V Rail-to-Rail Operational Amplifiers in Standard CMOS Technology [Text] / J.F. Duque-Carrillo and el // IEEE JSSC. – 2000. – Vol. 35. – №. 1. – P. 33-44.

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

INPUT RAIL-TO-RAIL AMPLIFIER FOR CMOS-COMPARATORS AND OPERATIONAL AMPLIFIERS WITH LOW SUPPLY VOLTAGE

V.S. Kononov, Candidate of Technical Sciences, Research Officer, JSC SKTB ES, Voronezh, Russian Federation, email: casandra1983@mail.ru

Analysis of input common-mode voltage range and transfer functions of well-known rail-to-rail amplifiers is done. It is found, that at low supply voltage of $1,8 \pm 5\%$ and typical threshold voltages of 0,9 V, input voltage range is 0,9-1,3 V depending on type of amplifier. It is shown, that rail-to-rail amplifiers based on two differential pairs of PMOS and NMOS transistors, don't have internal scale area with similar transfer function, where PMOS and NMOS transistors are simultaneously in active region. In rail-to-rail amplifiers with one differential pair internal scale area is about 400 mV, which is achieved at the cost of input resistance reduction. New rail-to-rail amplifier with input voltage range equal to supply voltage and high input resistance is considered in this paper. Two versions are offered, one of which has noise neutralizer. Amplifiers are intended for use in low-voltage comparators and operational amplifiers

Key words: CMOS, amplifier, range, comparator, operational amplifier

References

1. Kester W. Аналого-цифровое преобразование [Analog-Digital Conversion] / W. Kester – Moscow. – Technosfera, 2007. – 1016 p.
2. Duque-Carrillo J.F. 1-V Rail-to-Rail Operational Amplifiers in Standard CMOS Technology [Text] / J.F. Duque-Carrillo and el // IEEE JSSC. – 2000. – Vol. 35. – №. 1. – P. 33-44.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В БАЗИСЕ ПЛИС СЕРИИ 5578

А.В. Строгонов, П.С. Городков

Рассматривается структура программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) типа «программируемые пользователем вентиляльные матрицы» (ППВМ) с логическими блоками на основе адаптивных логических модулей серии 5578, разработанной в рамках импортозамещения зарубежной электронной компонентной базы. По архитектурным решениям новые отечественные ПЛИС занимают промежуточное положение между низкобюджетной серией Altera Cyclone II и высокопроизводительными ПЛИС серии Stratix III. Раскрываются особенности организации локальных и глобальных трассировочных ресурсов, блока цифровой обработки сигналов, режимы работы блока пользовательской памяти. Приводятся примеры проектирования цифровых фильтров с конечно-импульсной характеристикой с использованием САПР Altera Quartus II и вопросы программирования ПЛИС с применением среды разработки конфигурационных данных

Ключевые слова: линия задержки, умножитель, аккумулятор, фильтр, цифровая обработка сигналов

В рамках импортозамещения зарубежной электронной компонентной базы разработана новая серия ПЛИС 5578 по 180 нм КМОП-технологии с шестью слоями металлизации и напряжением питания 1,8 В. Серия представлена двумя типами ПЛИС 5578ТС014 и 5578ТС024. ПЛИС содержат увеличенную емкость встроенной памяти и ЦОС-блоки (аппаратные умножители), ранее отсутствующие в ПЛИС серии 5576.

ПЛИС 5578ТС014 и 5578ТС024 не являются прямыми аналогами зарубежных ПЛИС серии Cyclone II (EP2C5 и EP2C8, выполнены по 90 нм КМОП-технологии) фирмы Altera, а могут быть использованы для их замены. По архитектурным решениям новые отечественные ПЛИС занимают промежуточное положение между низкобюджетной серией Cyclone II [1] и высокопроизводительными ПЛИС серии Stratix III. ПЛИС серии 5578 так же близки по своим техническим характеристикам к ПЛИС серии Spartan III фирмы Xilinx.

В основе структуры ПЛИС лежат следующие компоненты: матрица памяти, управляющая коммутацией и режимами работы элементов ядра ПЛИС; система локальных (СЛМ) и глобальных межсоединений (СГМ) с блоками коммутации (БК); глобальные сигналы управления; логические блоки (ЛБ), состоящие из 8 адаптивных логических модулей (АЛМ), которые используются для реализации комбинационной логики, счетчиков, сумматоров, конечных автоматов состояний; блоки пользовательской памяти (БПП), использующиеся для реализации разнообразных функций памяти или сложных логических

функций; блоки цифровой обработки сигналов (БЦОС или ЦОС-блоки), предназначенные для реализации функций умножения, умножения-накопления и др., используемых при построении цифровых фильтров; модули ввода-вывода (МВВ), осуществляющие передачу сигналов между ядром и периферией ПЛИС; программируемые периферийные блоки ввода-вывода (БВВ).

На рис. 1 показана структурная схема ПЛИС серии 5578. Используются следующие сокращения: СЛМ – система локальных межсоединений; СГМ – система глобальных межсоединений; МПВВ – матрица памяти элементов ввода-вывода; МПЛБ – матрица памяти логического блока встроенной памяти; МПБЦОС – матрица памяти блока цифровой обработки сигналов; БВВ – буфер ввода-вывода; ВВ – элемент ввода-вывода; ЛБ – логический блок; БВП – блок встроенной памяти; БЦОС – блок цифровой обработки сигналов. В ПЛИС серии 5578 используется новая трассировочная структура с блоками памяти и цифровой обработки сигналов, содержащая 7 уровней программируемых межсоединений с длиной сегментируемых межсоединений в 4 кластера и различной шириной трассировочного канала из разнонаправленных пар межсоединений.

На рис. 2 показан фрагмент структуры ПЛИС серии 5578, поясняющий принцип организации многоуровневых межсоединений.

Фрагмент состоит из шести кластеров, расположенных в двух рядах соединительных блоков, коммутирующих сигналы с уровня трек (трек – короткое межсоединение в глобальном трассировочном канале) на уровень локальных межсоединений двух соседних кластеров. Между углами кластеров расположены два маршрутизатора. Кластер состоит из восьми АЛМ, имеет 16 выходов, выходящих на четыре внешние стороны кластера. Входы АЛМ расположены внутри

Строгонов Андрей Владимирович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: andreistrogonov@mail.ru, тел. 8(473)2437695

Городков Павел Сергеевич – аспирант, e-mail: gorodkoff@gmail.com, тел. 8(473)2437695

кластера и выходят на локальные межсоединения. Локальные межсоединения входят в кластер со всех сторон с соответствующих коммутаторов и расходятся ко всем входам АЛМ.

Логический блок ПЛИС серии 5578 отличается от ЛБ ПЛИС Altera серии Cyclone II. ЛБ состоит из 8 АЛМ, каждый из которых имеет 8 входов данных и может реализовывать одну произвольную 6-входовую или две произвольные 4-входовые функции.

В ЛБ входят 48 локальных линий, которые могут быть скоммутированы на входы данных АЛМ, а так же быть использованы для управляющих сигналов. В центре ЛБ находятся блоки формирования и коммутации управляющих сигналов. Управляющие сигналы могут быть получены с 6 глобальных выделенных шин или с локальных линий. Кроме того, ЛБ имеет специальные линии `register_chain` и `shared_arithmetic`, а также 3 линии распространения переноса (соответственно схеме суммирования с выбором переноса).

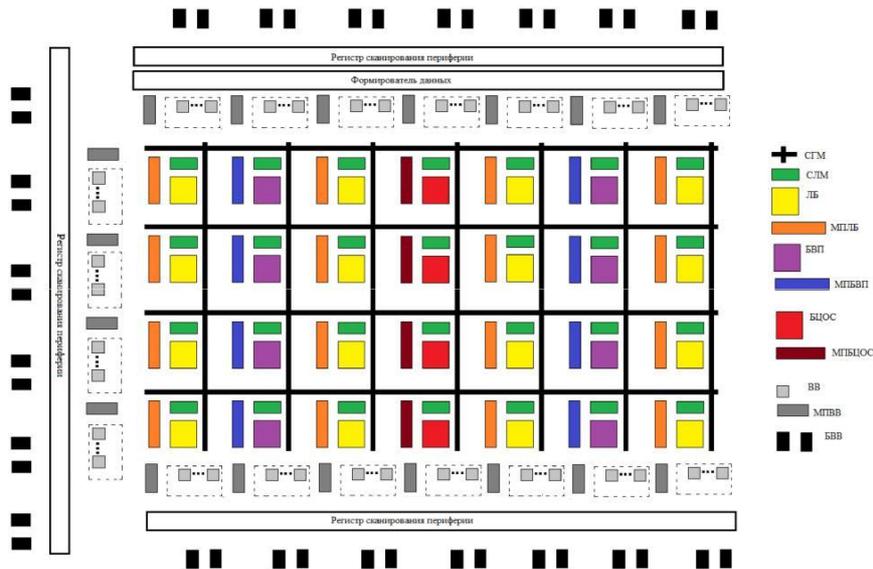


Рис. 1. Структура ПЛИС серии 5578

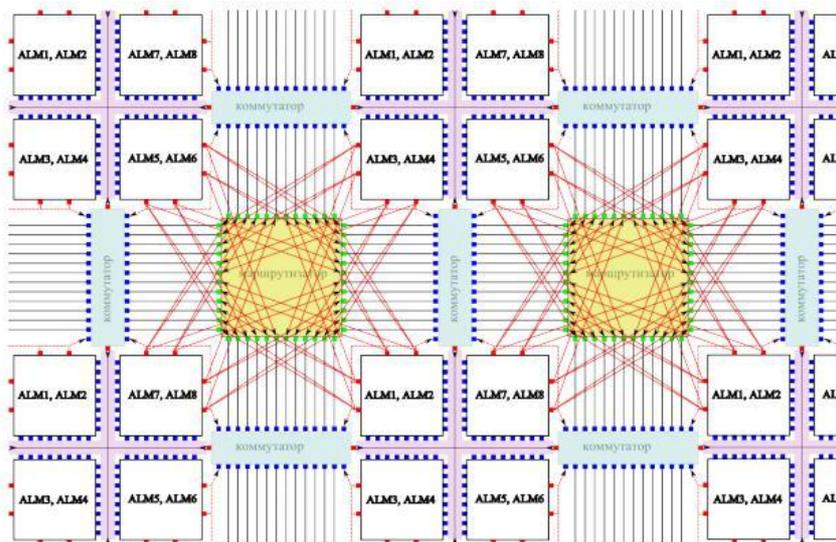


Рис. 2. Фрагмент структуры ПЛИС серии 5578, с локальными и глобальными трассировочными ресурсами

Разработанный АЛМ, по своей структуре схож с АЛМ ПЛИС серии Stratix III, обеспечивающий повышение быстродействия ПЛИС и эффективность упаковки проектов пользователя за счёт расширенных режимов работы LUT5, LUT6 и встроенного сумматора для логико-арифметических вычислений. В

ЦОС-блоках ПЛИС серии Cyclone II нет встроенных аппаратных сумматоров, и все арифметические операции выполняются на LUT, работающих в арифметических режимах.

АЛМ состоит из шести 3-входовых LUT, двух выделенных сумматоров и двух триггеров с возможностью синхронного и асинхронного

сброса, синхронной загрузки из нескольких источников, использования обратной связи и обвода триггера.

Блок пользовательской памяти. БПП предназначен для эффективного хранения пользовательских данных, передачи данных между доменами с помощью FIFO, хранения буферов и т. д. БПП поддерживают однопортовый (single-port), простой двухпортовый (simple dual-port) и полнофункциональный двухпортовый (true dual-port) режимы работы. По своей структуре БПП близок к блоку памяти типа М4К ПЛИС серии Cyclone II.

Основные характеристики блока: 4096 бит памяти на блок (4608 бит включая биты чётности); поддержка различных конфигураций портов; полнофункциональный двухпортовый режим (два независимых порта с возможностью чтения и записи по каждому); сигнал byte enable для маскирования входов при записи; возможность инициализации содержимого памяти при загрузке.

Блок цифровой обработки сигналов. ЦОС-блок используется для эффективной реализации функций, используемых при цифровой обработке сигналов. Структурная схема ЦОС-блока показана на рис. 3. По своей структуре ЦОС-блок ПЛИС серии 5578 близок к ЦОС-блоку ПЛИС Altera Cyclone II, но имеет некоторые архитектурные особенности, например, содержит аппаратный сумматор на выходах умножителя. Состоит из входных и выходных регистров, умножителя с размерностью операндов 18x18.

По классификации фирмы Altera ЦОС-блок ПЛИС серии Cyclone II (DSP Block) называют MAC-Block, т. к. его основной функцией является умножение и накопление.

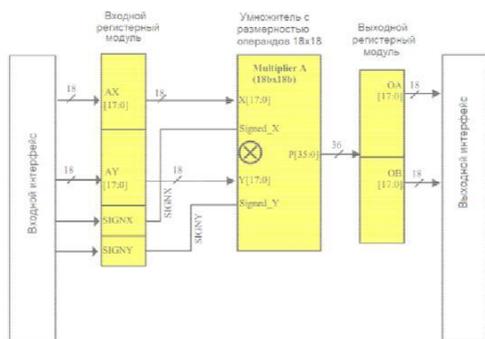


Рис. 3. Структура ЦОС-блока ПЛИС серии 5578 в режиме совместимости с MAC-блоком ПЛИС Altera Cyclone II

В каждом ЦОС-блоке имеется возможность скоммутировать входные сигналы на входные регистры или напрямую на умножитель. Каждый вход может быть скоммутирован через регистры независимо от других. Также возможно

скоммутировать выходной сигнал на выходные регистры или напрямую на выход.

Для входных и выходных регистров используются следующие управляющие сигналы: тактовый сигнал; сигнал разрешения тактирования; асинхронный сброс. Все входные и выходные регистры в пределах одного ЦОС-блока управляются одним тактовым сигналом, сигналом разрешения тактирования и асинхронным сбросом.

Умножитель поддерживает разрядности 18x18 бит и менее. Для определения знакового представления переменных используются сигналы signa и signb. Если сигнал signa или signb находится в состоянии высокого уровня, то dataa или datab имеют знаковое представление. Если хотя бы одна из переменных знаковая, то результат умножения тоже знаковый.

Маршрут проектирования цифровых устройств в базе ПЛИС серии 5578.

Процесс проектирования ПЛИС серии 5578 осуществляется в САПР Altera Quartus II версии 9.0 до 13.0 включительно с поддержкой ПЛИС серии Cyclone II и основывается на использовании VQM-файлов (Verilog Quartus Mapping). VQM-файл является ограниченным подмножеством формата Verilog и используется для технологического мэппинга (отображения) проекта с помощью сетевых примитивов в уникальный базис ПЛИС.

Составной частью процесса компиляции проекта в базис ПЛИС является этап анализа и синтеза. Под термином “синтез логики” следует понимать автоматическое преобразование проекта с уровня регистровых передач (RTL) на уровень вентилей технологического базиса ПЛИС.

VQM-файл можно извлечь как на этапе анализа и синтеза, так и после полной компиляции, с учетом размещения и трассировки. В случае его повторного использования в проекте размещение, трассировка и временной анализ исключаются.

На этапе синтеза логики в САПР Altera Quartus II с помощью опции Start VQM Writer меню Start необходимо получить синтезированный нетлист проекта.

В целом процесс проектирования очень похож на использование программных продуктов сторонних разработчиков на этапе анализа и синтеза, например, синтезатор Synplicity Synplify. Синтезатор Synplify Pro позволяет по VHDL/Verilog-проектам созданным в САПР Quartus II создавать “свои” VQM-файлы и разводить их в технологический базис ПЛИС с помощью “своих” алгоритмов размещения и трассировки. VQM-файлы, созданные с помощью Synplify Pro, отличаются по формату

от VQM-файлов созданных Quartus II (синтезатор QIS, Quartus II Integrated Synthesis от Altera) но САПР Quartus II допускает их повторное использование в проектах.

Для программирования ПЛИС создана среда разработки конфигурационных данных. Кратко рассмотрим лишь некоторые возможности этой среды.

Среда разработки читает VQM-файлы, созданные с помощью синтезатора QIS от Altera. Базируется на открытом программном инструменте ODIN-II [2]. ODIN-II конвертирует VQM-файл в специальный файл в blif (Berkeley Logic Interchange Format) формате, в котором выделяет логические вентили для описания логики устройства и “черные ящики” для гетерогенных блоков, таких как умножители, блоки памяти и др. Синтаксический анализатор ODIN-II разработан на основе программных средств bison (лексический анализатор) и flex (синтаксический анализатор). По Verilog-коду синтаксический анализатор ODIN-II строит абстрактное синтаксическое дерево. Далее с использованием специального программного инструмента проводится технологический мэппинг в базис ПЛИС серии 5578, оптимизация и последующее размещение и трассировка.

Для обеспечения гарантированного размещения пользовательских проектов в ПЛИС 5578TC014, 5578TC024 на этапе работы с САПР Quartus II (ф. Altera) необходимо учитывать следующие рекомендации по максимальному количеству задействованных в проекте логических элементов — 3200 (для ПЛИС 5578TC014) и 3400 (для ПЛИС 5578TC024).

Особенность представления конфигурационных файлов для ОЗУ и ПЗУ в проектах пользователя показано ниже (пример 1, пример 2).

```
WIDTH=8;
DEPTH=4;
ADDRESS_RADIX=UNS;
DATA_RADIX=BIN;
CONTENT BEGIN
  0 : 00000000; 1 :
    00000000; 2 :
    00000000; 3 :
    00000000;
END;
```

Пример 1. Конфигурация ОЗУ

```
WIDTH=8;
DEPTH=4;
ADDRESS_RADIX=UNS;
DATA_RADIX=BIN;
CONTENT BEGIN
  0 : 11111110; 1 :
    11111111; 2 :
    00000111; 3 :
    00000110;
END;
```

Пример 2. Конфигурация ПЗУ

В работах [3,4] рассматривались следующие проекты последовательного КИХ-фильтра на четыре отвода для ПЛИС Cyclone II Device EP2C5F256C8 и Cyclone III Device EP3C5F256C6:

1. Умножитель на мегафункции LPM_MULT, аккумулятор на мегафункции ALTACCUMULATE [3,4];
2. Умножитель и аккумулятор на мегафункции ALTMULT_ACCUM [3,4];
3. Линия задержки на основе двухпортовой памяти (мегафункция RAM: 2 port, режим Simple Dual Port с инициализацией), ПЗУ для хранения коэффициентов (мегафункция ROM: 1 port, с инициализацией). Для выходной шины q установлен режим I do not care [3].
4. Параллельная реализация КИХ-фильтра. Четыре умножителя в одном блоке на мегафункции alt_mult_accum [3].

Первые два проекта основаны на примере, поставляемом с САПР Quartus II. Его можно найти по адресу altera\90\qdesigns\fir_filter а для версии 13.0 - altera\13.0\quartus\qdesigns\fir_filter.

Сведения по числу задействованных ресурсов ПЛИС Altera Cyclone II Device EP2C5F256C8 представлены в табл. 1. В табл. 2 приводятся сведения по числу задействованных ресурсов ПЛИС серии 5578TC014.

Оценить рабочую частоту проекта возможно с помощью временного анализа с использованием файлов временных ограничений в формате SDC. Опция “Временной анализ” позволяет задавать пути с наименьшим запасом времени, информация по которым попадает в отчёт. Доступен выбор рабочих условий, для которых проводится анализ: «лучшие» и «худшие».

Таблица

1 Общие сведения по числу задействованных ресурсов ПЛИС Altera Cyclone II Device EP2C5F256C8, временная модель TimeQuest анализа Slow-model [1,2]

Проект	Число логических элементов (Total logic elements)	Число LUT с 4/3/<=2 входами	Триггеров логических элементов (Dedicated logic registers)	Блоков памяти, М4К, бит	Аппаратных умножителей с размерностью операндов 9x9 (Embedded Multiplier 9-bit elements)	Рабочая частота в наихудшем случае F _{max} , МГц
Последовательный КИХ-фильтр на четыре отвода						
1.	91	37=16/18/3	72	-	1	125.05
2.	89	37=16/18/3	70	-	1	105.35
3. Для выходной шины q установлен режим Old memory contents appear	49	27=0/23/4	41	ОЗУ: 32 ПЗУ: 32	1	190.62
4. Линия задержки на основе двух портовой памяти (Shift Register (RAM-based))	70	36=16/15/5	54	ОЗУ: 32 ПЗУ: 64	1	163.03
Параллельный КИХ-фильтр на четыре отвода						
5.	41	29=0/26/3	22	-	4	131.6

Таблица 2

Общие сведения по числу задействованных ресурсов ПЛИС 5578TC014

Проект	Соотношение триггеров ЛБ к LUT (alm_ff/lcell_comb)	Число логических блоков	Число LUT с 4/3/2 входами	Триггеров ЛБ (alm_ff)	Аппаратных умножителей (dsp18)	Блоков памяти (dpbram)
Последовательный КИХ-фильтр на четыре отвода						
1	72/46	73	46=19/3/24	72	1	-
2	70/46	72	46=24/3/19	70	1	-
3	41/29	43	29=0/21/8	41	1	2
4 Не реализуется	-	-	-	-	-	-
Параллельный КИХ-фильтр на четыре отвода						
5	22/32	44	32=0/0/32	22	4	0

Выводы

По архитектурным решениям новые отечественные ПЛИС занимают промежуточное положение между низкобюджетной серией Cyclone II и высокопроизводительными ПЛИС серии Stratix III. Так использование двух портовой памяти в качестве линии задержки, встроенных умножителей и аппаратных сумматоров позволяют разрабатывать высокопроизводительные устройства цифровой обработки сигналов [5].

Использованием АЛМ позволяет уменьшить число используемых логических блоков ПЛИС 5578TC014 в проектах пользователя по сравнению с числом логических элементов в ПЛИС Cyclone II EP2C5F256C8. Однако, как показывает эксперимент (проекты 1,2 и 5), общее число используемых LUT для ПЛИС 5578TC014 немного выше, но при этом происходит перераспределение реализации комбинационных функций на 3-входовых LUT к 2-входовым LUT и возрастание числа используемых 4-входовых LUT.

К недостаткам блоков памяти можно отнести отсутствие режима “Old memory contents appear” (режим одновременного чтения и записи по одинаковому адресу в блоках памяти) в этом случае не удастся реализовать линию задержки на основе двух портовой памяти с использованием мегафункции altshift_taps (Shift Register (RAM-based)) (табл.2, проект 4).

Литература

1. Altera. White Paper. FPGAs for High-Performance DSP Applications. May 2005, ver. 1.1.
2. Строгонов, А. САПР VTR7 для проектирования академических ПЛИС [Текст] / А. Строгонов, С. Цыбин, П. Городков // Компоненты и технологии. – 2016. - N3.
3. Строгонов, А. Особенности использования двух портовой памяти при проектировании последовательных КИХ-фильтров в САПР ПЛИС Quartus II [Текст] / А. Строгонов, С. Цыбин, П. Городков // Компоненты и технологии. – 2016. - N4.
4. Строгонов, А. Проектирование последовательных КИХ-фильтров в САПР ПЛИС Quartus II [Текст] / А. Строгонов, С. Цыбин, П. Городков // Компоненты и технологии. – 2016. - N1.

Воронежский государственный технический университет

FEATURES OF DESIGNING DEVICE DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN THE FPGA BASIS SERIES 5578

A.V. Srogonov, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh,
Russian Federation, e-mail: sto@sci.vrn.ru

P.S. Gorodkov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-
mail: gorodkoff@gmail.com

The programmable logic integrated circuit (PLD) such as field programmable gate arrays (FPGAs) structure with the logical blocks on the basis of adaptive logic modules of 5578 series developed as part of the import substitution of foreign electronic components programme is considered. According to architectural solutions, new domestic FPGAs are intermediate notched up a series of low-budget between the Altera Cyclone II FPGA and high-performance series of Stratix III. Special aspects of the organization of local and global wiring resources, block for digital signal processing and modes of user memory block are reported. There are examples of the design of digital filters with finite impulse response using CAD Altera Quartus II FPGA and programming issues with the configuration data development environment.

Key words: delay line, multiplier, accumulator, filter, digital signal processing

References

1. Altera. White Paper. FPGAs for High-Performance DSP Applications. May 2005, ver. 1.1.
2. Strogonov A., Cybin S., Gorodkov P. SAPR VTR7 dlja proektirovanija akademicheskikh PLIS [VTR7 CAD for designing academic FPGA] // Komponenty i tehnologii, 2016, N3.
3. Strogonov A., Cybin S., Gorodkov P. Osobennosti ispol'zovanija dvuh portovoj pamjati pri proektirovanii posledovatel'nyh KIH-fil'trov v SAPR PLIS Quartus II [Features of use of the two port memory in the design of sequential FIR filters in the CAD Quartus II FPGA] // Komponenty i tehnologii, 2016, N4.
4. Strogonov A., Cybin S., Gorodkov P. Proektirovanie posledovatel'nyh KIH-fil'trov v SAPR PLIS Quartus II [Designing sequential FIR filters in the CAD Quartus II FPGA] // Komponenty i tehnologii, 2016, N1.
5. Strogonov A.V. Cifrovaja obrabotka signalov v bazise programmiruemyh logicheskikh integral'nyh shem [Digital signal processing in the basis of programmable logic integrated circuits]: Uchebnoe posobie. – 2-e izd., ispr. i dop. – SPb.: Izdatel'stvo “Lan”, 2015. -310 s.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Д.В. Журавлёв, Ю.С. Балашов, Д.В. Шеховцов

Разработанная система мониторинга представляет собой организационно-технический комплекс, который имеет возможность обеспечивать сбор, передачу, обработку, хранение, вывод и стратегический анализ данных. Рассмотренная концептуальная модель системы мониторинга предполагает использование блочно-модульного принципа построения системы, что позволяет формировать её иерархический состав гибко и просто в зависимости от задач применения. Выделены пути реализации устройств регистрации сигнала для универсальной системы мониторинга различных показателей. Проведен обзор основных блоков устройств регистрации с описанием их функциональных задач. Реализация основной программно-управляемой части универсальной системы мониторинга осуществлена на интегральных микросхемах типа «система на кристалле». Выделены этапы разработки «системы на кристалле». Представлена структурная схема «системы на кристалле», полученная в результате декомпозиции системы. Описаны архитектурные особенности основных блоков «системы на кристалле», подвергшейся декомпозиции. Представлена организация работы устройств регистрации на базе микроконтроллера 1874VE96T. Приведен пример использования системы с различными датчиками и исполнительными механизмами

Ключевые слова: мониторинг, дистанционный контроль, универсальная система, система на кристалле, декомпозиция проекта

Постановка задачи

В настоящее время бурное развитие радиотехники и электроники порождает создание большого количества телеметрических систем “измерения текущих параметров” в различных отраслях науки и техники, таких как: узлы магистральных линий связи; сельское хозяйство; водоснабжение и водоотведение; оборона и космос; разведка; ракетная техника; авто- и мотоспорт; бурение наклонных скважин; системы глобального позиционирования (в том числе спутниковый мониторинг транспорта); энергетика; мониторинг дата-центров; системы безопасности; умные дома; исследование дикой природы; телемедицина. В качестве среды передачи данных используются как беспроводные (радио, GSM/GPRS, ZigBee, WiFi, WiMax, LTE), так и проводные (телефонные, ISDN, xDSL, компьютерные) сети (электрические или оптические).

Среди огромного разнообразия реализаций систем телемониторинга существует необходимость выделения единой стандартизированной аппаратно-программной части, которая должна иметь возможность применения в большинстве телесистем. Данная аппаратно-программная часть должна обладать малыми габаритными размерами, весом, энергопотреблением и обеспечивать возможность регистра-

ции, обработки и передачи в глобальную компьютерную сеть собранной информации. Аппаратно-программная часть также должна обеспечивать быстрое её перепрограммирование для возможности использования в различных системах.

Современные системы регистрации и обработки показаний разнообразных датчиков (параметров окружающей среды, физических процессов, биометрических показателей и др.) ориентированы, на работу в условиях узкой, специфической области применения. Эти ограничения обычно связаны с физическими условиями функционирования системы, типами и спецификациями используемых датчиков, применяемыми каналами связи. Строго определенная, заранее заданная область использования системы, ограничения, накладываемые ее структурными компонентами, в частности датчиками какого-либо конкретного типа, делают подобные системы негибкими, нацеленными лишь на строго определенную работу. Перестройка подобных системы для решения других задач, даже схожих с базовой, подчас совершенно невозможна. Новая задача требует разработки новой системы.

В силу вышеизложенного для формирования универсальной аппаратно-программной части использован микроконтроллер 1874VE96T (система на кристалле). Разработаны микродатчики-регистраторы, работающие под управлением данного микроконтроллера. Микродатчики-регистраторы представляют собой малогабаритные перепрограммируемые устройства, позволяющие проводить сбор, предваритель-

Журавлёв Дмитрий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: ddom1@yandex.ru, <http://Б-Б.su>
 Балашов Юрий Степанович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: faddey52@mail.ru
 Шеховцов Дмитрий Витальевич – ОАО «НИИЭТ», начальник лаборатории, e-mail: wex@niiet.ru

ную обработку и передачу, посредством стандартных технических средств, собранной информации на удаленный сервер. Количество микродатчиков-регистраторов, входящих в универсальную систему, не ограничено и определяется только задачами системы.

Предлагаемая универсальная система предназначена для регистрации показаний датчиков (концентрации газа, температуры, дыма, биологических параметров живых организмов и др.) в режиме реального времени, анализа показаний датчиков, определения граничных значений показаний, генерации и выдачи информационных сообщений о приближении показаний датчиков к граничным значениям и превышении допустимых границ (предупреждения, тревога), формировании управляющих сигналов для управления исполнительными механизмами. Область сферы применения системы ограничена лишь набором сенсоров (аналоговых и цифровых датчиков). Система способна отслеживать показания различных типов датчиков одновременно, например, следить за концентрацией углекислого газа в помещении, частотой пульса человека, атмосферным давлением и влажностью, передавая одновременно все необходимые параметры на удаленный пульт и формировать управляющие сигналы для исполнительных устройств: включить вентиляцию, управлять освещением и т.д.

Возможные сферы применения системы: контроль состояния биометрических параметров человека (пульс, температура тела, давление, дыхание, концентрация сахара в крови, медицинских препаратов средах и др.);

отслеживание концентрации газов и вредных веществ в воздухе;

контроль протекания физических и химических процессов;

системы управления механизмами и агрегатами с большим количеством датчиков.

Универсальная система является высокопроизводительным программируемым комплексом, с возможностью реализации программных алгоритмов регистрации и обработки показаний датчиков, алгоритмов и протоколов обмена по последовательным интерфейсам и радиоканалу, и позволяет:

работать с широким спектром внешних датчиков, в том числе с интеллектуальными датчиками, имеющими собственные встроенные алгоритмы регистрации и обработки показаний;

выполнять быстрое перепрограммирование, адаптацию к требуемым условиям функционирования;

производить гибкую подстройку диапазона чувствительности системы отдельно для каждого входного канала регистрации показаний к электрическим характеристикам датчика;

передавать данные (показания датчиков, командные последовательности и др.) по каналам связи, с использованием различных высокоскоростных протоколов передачи данных, а также по радиоканалу;

формировать управляющие сигналы для исполнительных устройств (двигатели, приводные механизмы, системы управления и др.);

выполнять удаленное администрирование, глобальное конфигурирование, подстройку параметров;

осуществлять программную коррекцию в зависимости от погрешности датчиков.

Структурная схема универсальной системы обработки представлена на рис. 1.

В структуру универсальной системы входят следующие основные блоки:

Система на кристалле в составе:

процессорное ядро, логика управления и принятия решений;

память программ;

память данных;

АЦП;

блок цифровых компараторов;

модули приема/передачи данных;

блок ШИМ;

модуль высокоскоростного ввода/вывода;

Блок усиления/нормализации уровней сигналов аналоговых датчиков;

Цифровые интерфейсы захвата данных с интеллектуальных датчиков;

Модуль внешних интерфейсов, поддерживающий различные стандарты обмена данными.

Микродатчики-регистраторы

Основой микродатчиков-регистраторов является микропроцессорное ядро, выполняющее программу, которая содержится во встроенной памяти программ системы на кристалле или во внешней памяти. Программа может быть изменена по желанию пользователя под конкретные задачи (обработка показаний датчиков дыма, тахометрических датчиков, датчиков пульса и др.).

Система принимает решения исходя из показаний датчиков, которые могут быть подключены по двум типам интерфейсов: аналоговому и цифровому.

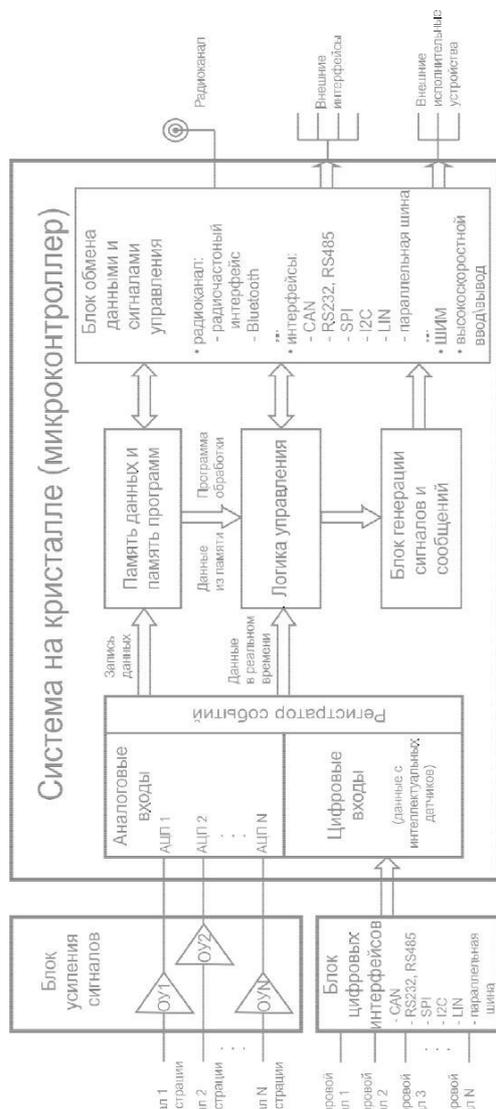


Рис. 1. Структурная схема универсального микродатчика-регистратора

Аналоговый интерфейс осуществляет захват показаний датчиков как непосредственно с чувствительных элементов датчиков без промежуточной обработки, так и после встроенных схем усиления датчиков (при наличии таковых), а также выполняет начальную обработку аналоговых сигналов (адаптацию к входным параметрам АЦП).

Для эффективной работы с датчиками, выходные сигналы которых могут находиться в широком диапазоне напряжений, от единиц микровольт до десятков вольт, в структуру системы входит блок усиления/нормализации аналоговых сигналов, в составе которого ис-

пользуется набор операционных усилителей с регулируемым коэффициентом усиления. Слабые сигналы усиливаются, а сильные сигналы ослабляются до рабочих уровней аналого-цифровых преобразователей, осуществляющих оцифровку сигналов датчиков.

Нормализованные сигналы датчиков поступают на входы АЦП, входящих в состав системы на кристалле, которые выполняют оцифровку их в масштабе реального времени.

Цифровой входной интерфейс может принимать предварительно обработанные данные с внешних датчиков и передавать предварительно оцифрованные сигналы на последующую обработку минуя тракт аналоговых преобразователей. Обмен цифровыми данными при этом может производиться по различным видам протоколов: CAN, RS232, RS485, SPI, I2C, LIN, параллельная шина и др. В этом случае в качестве внешних датчиков могут быть использованы интеллектуальные датчики или аналоговые датчики с внешними АЦП.

Регистратор событий, в структуру которого входят встроенные АЦП и цифровые интерфейсы приема данных, передает оцифрованные сигналы датчиков на последующую обработку, при этом данные могут быть помещены на хранение в память данных и вызываться из этой памяти при необходимости.

Программа обработки показаний датчиков выполняется из внутренней памяти системы на кристалле или из внешней памяти программ и сравнивает текущие показания или данные, вызываемые из памяти, с пороговыми значениями, которые могут быть запрограммированы предварительно и определены независимо для каждого типа или номера датчика. Количество ступеней программного компаратора ограничено фактически лишь разрядностью АЦП, что позволяет реализовать с помощью системы большое количество уровней формирования предупреждающих сообщений и индикаторов тревоги. Ресурсы системы поддерживают программную коррекцию показаний датчиков, учитывая технологически обусловленный разброс параметров датчиков, а также, в зависимости от требований потребителя, позволяют выполнять различные виды подстройки системы под показания тех или иных датчиков (температурную коррекцию, подстройку порога чувствительности и др.).

После формирования сигналов сообщений о приближении к порогу срабатывания, предупредительных сообщений или сигналов тревоги вступает в работу блок обмена данными и сигналами управления. Выработанные сигналы

передаются выбранным способом на пульт управления, если таковой имеется в составе общего комплекса: по радиоканалу, последовательным (CAN, RS232, RS485, SPI, I2C, LIN и др.) или параллельному интерфейсу, либо на устройство предупреждения и тревоги, роль которого могут выполнять устройства аудио или видео оповещения, различные визуальные и звуковые сигнализаторы.

Блок обмена данными и сигналами управления поддерживает обмен данными или командами с любыми другими внешними устройствами по перечисленным выше протоколам, позволяет выполнять программирование системы в соответствии с требованиями потребителя, изменять программный код в зависимости от типа используемых датчиков, корректировать алгоритмы обработки сигналов датчиков и формирования ответных сигналов, что делает систему гибкой и универсальной, обеспечивает возможность использования ее для широкого спектра приложений и применений.

Ресурсы системы позволяют формировать управляющие сигналы для исполняющих механизмов, осуществлять их включение\отключение, регулировку режимов работы. Встроенный многоканальный модуль ШИМ и модуль высокоскоростного ввода\вывода могут использоваться для формирования управляющих последовательностей электрических двигателей. Пример использования формирователей – запуск двигателей приточной вентиляции в случае повышения концентрации углекислого газа в атмосфере рабочих помещений и изменение скорости притока в зависимости от концентрации газа.

Разработка системы на кристалле: декомпозиция проекта

Универсальная система на кристалле является сложным многокомпонентным устройством, состоящим из цифровых, цифро-аналоговых и аналоговых блоков различного назначения и уровня сложности. Разработку системы целесообразно выполнять с помощью метода комплексного нисходящего иерархического проектирования, подразумевающего выполнение следующих этапов:

1. *Системное проектирование.* Заключается в декомпозиции проекта, т.е. разбиении его на составные части, блоки, выбор общей архитектуры устройства, определении способов взаимодействия составных частей друг с другом, выборе протоколов обмена данными и сигналами управления, разработке спецификаций для каждого блока, что необходимо для обеспечения предельных и оптимальных элек-

трических, временных и функциональных характеристик структурных единиц изделия.

2. *Проектирование или подбор компонентов системы.* На данном этапе определяются основные способы выполнения требований спецификаций, разработанных на этапе системного проектирования, осуществляется физическая разработка и отладка отдельных компонентов системы или заимствование подходящих компонентов, заключающееся в анализе и подборе наиболее подходящих компонентов в соответствии со спецификациями.

3. *Сборка системы, физическое проектирование.* На данном этапе выполняется иерархическое объединение блоков проекта в единое целое. Разработанные на этапе проектирования блоки организуются в соответствии со спецификациями в единый комплекс. Выполняется функциональное моделирование проекта, разработка физического представления системы (топология), аналоговое (смешанное) моделирование, функционально-параметрическая отладка системы.

4. *Программное проектирование, отладка проекта.* На этом этапе разрабатывается базовое программное обеспечение системы, разработка системного монитора, производится отладка программного обеспечения, отработка алгоритмов взаимодействия компонентов внутри системы и системы с внешними устройствами.

Декомпозиция проекта позволяет выделить следующие структурные единицы, подлежащие разработке или заимствованию:

основа универсальной системы (рекомендуется реализация в виде системы на кристалле);
аналоговые датчики; интеллектуальные датчики (цифровые);
модуль нормализации выходных сигналов аналоговых датчиков;
контроллеры интерфейсов обмена данными с внешними устройствами; модули управления исполнительными механизмами; модуль радиоканала или другая подсистема
обмена данными и сигналами управления с внешними удаленными устройствами, например, с пультом управления или системой регистрации и сбора информации.
Реализацию основной программно-управляемой части универсальной системы регистрации целесообразно выполнять в виде интегральной микросхемы типа «система на кристалле», что позволяет получить в итоге ком-

пактное устройство с низким потреблением, высоким быстродействием, максимальным набором функциональных параметров, большим объемом встроенной памяти, необходимой для реализации гибких пользовательских программ, широким набором периферийных интерфейсов для быстрого обмена данными с внешними устройствами, наличием встроенного многоканального АЦП требуемой разрядностью. Система на кристалле должна работать под управлением высокопроизводительного процессорного ядра с удобной и гибкой системой команд.

Для качественной разработки гибкой подсистемы управления (микроконтроллера) также необходимо произвести декомпозицию системы на кристалле для определения подходящей архитектуры и последующего поблочного иерархического проектирования. Для формирования быстрой, надежной и гибкой системы представляется целесообразным разработка системы на кристалле со следующей архитектурой:

- 16 или 32-разрядное процессорное ядро (ЦПУ), работающее на частотах от 20 МГц и выше, обеспечивающее конвейерную обработку команд/данных, что позволит получить высокое быстродействие всей системы с минимальным количеством циклов простоя процессорного ядра;
- модуль PTS (сервер периферийных транзакций), поддерживающий передачу данных в момент простоя шины данных, что обеспечивает транзакции без остановки ЦПУ, повышая тем самым быстродействие системы, задействует высокоскоростной обмен данными, необходимый для контроля за датчиками в масштабе реального времени;
- быстродействующий 8-16 канальный АЦП с разрядностью 12-16 бит или несколько независимых АЦП, поддерживающих оцифровку как одиночных, так и непрерывно меняющихся сигналов. Оптимальным является применение АЦП со встроенным усилителем входных сигналов с программируемым коэффициентом усиления и поддерживающим дифференциальный и несимметричный режим работы входов. Наличие блока цифровых компараторов в составе АЦП позволит обеспечить аппаратную фиксацию событий, регистрируемых аналоговыми датчиками, фиксацию выхода состояния входных сигналов за границы установленного рабочего диапазона без приме-

- нения программных решений, сократив тем самым загрузку ядра системы и общее время отклика на событие;
- встроенная память программ и память данных типа Flash, EEPROM объемом 8 К и более;
- ОЗУ объемом 1К и более; модули последовательных интерфейсов типа UART, I2C, SPI;
- параллельные порты ввода\вывода; модуль многоканальных широтно-импульсных модуляторов;
- модуль HSIO – подсистема высокоскоростной регистрации внешних событий, высокоскоростного вывода и формирования последовательности тактовых импульсов, необходимая для использования в быстродействующих системах управления;
- система управления энергопотреблением, обеспечивающая гибкое управление потреблением за счет реализации различных режимов сохранения мощности, в том числе с помощью отключения неиспользуемых периферийных блоков от ветвей тактирования;
- модуль отладки пользовательских программ, позволяющих выполнять качественную пошаговую отладку загруженных в память системы программ.

На рис. 2 представлена структурная схема системы на кристалле, полученная в результате декомпозиции системы. Ниже описаны архитектурные особенности основных блоков системы на кристалле, подвергшейся декомпозиции. Оформление подробных спецификаций представленных ниже блоков целесообразно выполнять на этапе системного проектирования после окончательного выбора архитектурных особенностей системы.

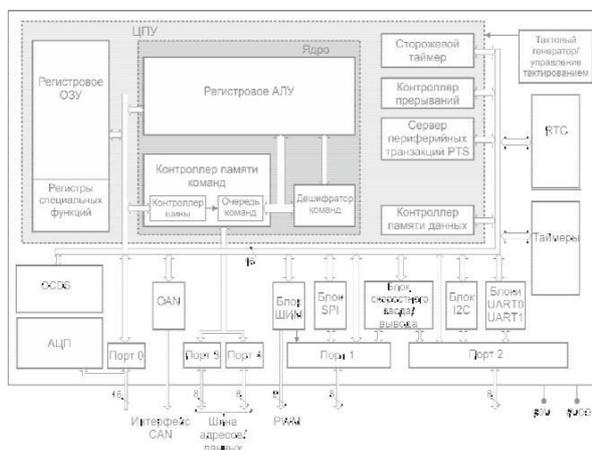


Рис. 2. Структурная схема системы на кристалле, полученная в результате декомпозиции системы

Организация работы ЦПУ

Обмен ЦПУ с перечисленными блоками предлагается выполнять, используя протоколы шинного обмена с отдельными шинами адреса и данных. Кроме того для расширения адресного пространства целесообразно представляется такая организация системы, при которой возможно подключение внешних запоминающих устройств, например, с помощью внешней мультиплексной шины адреса/данных, совмещенной с параллельными портами ввода/вывода. Такое решение позволит существенно расширить объем адресуемой памяти системы, а также использовать различные программы обработки событий без перестройки и перепрограммирования системы за счет того, что одна из программ может находиться во внутренней памяти системы на кристалле, а еще несколько различных программ могут располагаться на внешних адресуемых запоминающих устройствах.

Для построения подобной системы подходит архитектура Фон Неймана. Система, реализованная по указанной архитектуре имеет системную магистраль для обмена данными с внешней памятью и дополнительными периферийными устройствами. Система команд предлагаемого устройства сможет поддерживать широкий набор методов адресации, в т.ч. битовую адресацию. Процесс выборки и выполнения команд независимый, что позволяет минимизировать время простоя, как контроллера команд, так и ЦПУ. С целью расширения функционала системы, т.е. для обеспечения ее функциональности целесообразно ввести в систему возможность управления стартовым адресом, что позволит запускать выполнение программы с различных внешних запоминающих устройств или из различных областей внутренней памяти.

Аналого-цифровой преобразователь

Разрешающая способность АЦП обеспечивает качество оцифровки сигналов датчиков, так 14-16 АЦП способен качественно преобразовывать слабые или изменяющиеся в небольшом диапазоне амплитуд сигналы. По этой причине, а также с целью оптимизации оцифровки сигналов с различной амплитудой рекомендуется выполнять разработку или использовать СФ блок АЦП с разрешающей способностью 14-16 бит, встроенным усилителем входных сигналов и поддержкой обработки непрерывно меняющихся сигналов. Для уменьшения действия синфазных помех необходимо предусмотреть возможность работы АЦП в режиме дифференциального входа. Оптимальной архитектурой модуля АЦП является схема с независимой обработкой каждого канала, позволяю-

щая задавать настройки преобразования для каждого канала отдельно, либо АЦП, способный работать в режиме сканирования каналов. Рекомендуемое количество входных каналов АЦП – 8-16.

Устройство скоростного ввода вывода HSIO

Модуль скоростного ввода может записывать время внешних событий с определенной разрешающей способностью, обеспечивая регистрацию внешних событий независимо по нескольким входным каналам и может быть использован при работе с цифровыми и интеллектуальными датчиками. Захват событий целесообразно предусмотреть по различным условиям (нарастающий/спадающий фронт сигнала и др.).

Модуль высокоскоростного вывода предназначен для инициализации событий в определенные моменты времени, базирующиеся на значениях внутренних таймеров. Эти события могут заключаться, например, в запуске преобразования, формирования программных временных задержек, установке или сбросе выходных линий. Выходные линии могут использоваться в качестве ШИМ-формирователя с изменяемой частотой и скважностью для подключения цифровых и интеллектуальных датчиков.

Часы реального времени RTC

Наличие модуля часов реального времени RTC с независимым таймером позволит: отсчитывать текущую дату и время; контролировать время наступления событий в масштабе реального времени, запоминать и передавать время прихода сигналов датчиков, измерять длительные интервалы времени, например, между сигналами датчиков.

Модули последовательных интерфейсов

Контроллеры последовательных интерфейсов в составе системы на кристалле могут быть использованы как для обмена данными между блоками универсальной системы, так и для командного управления и обмена данными между системой и внешними устройствами.

В составе системы на кристалле целесообразно предусмотреть следующие модули последовательной передачи информации, обеспечивающие высокую степень универсальности передачи данных за счет обеспечения поддержки ряда широко используемых протоколов:

Синхронный последовательный интерфейс SPI. Интерфейс предназначен для быстрого синхронного обмена данными между системой на кристалле и периферией, например, между системой и модулем радиоканала, или между несколькими системами. Протокол SPI должен поддерживать: пол-

нодуплексную, трехпроводную синхронную передачу данных, работу в режимах Master или Slave, обмен данными начиная с «младшего» или «старшего» бита, программирование скорости передачи;

Двухпроводный последовательный синхронный интерфейс I2C. Модуль должен обеспечивать полную поддержку двухпроводного синхронного интерфейса I2C/SMBus, что позволит обеспечить легкое соединение со многими запоминающими устройствами и устройствами ввода/вывода, включая EEPROM, SRAM, счетчики, АЦП, ЦАП и др. периферийными устройствами. Модуль должен обеспечивать следующие функции: поддержку стандартного (Standart), скоростного (F/S) и высокоскоростного (Hs) режимов; работу в режимах Master или Slave, возможность подключения нескольких ведущих устройств (режим Multi-Master); возможность одновременного обращения ко всем устройствам шины (global call), функции отслеживания ошибок в пакетах данных, возможность обращения одного или нескольких Slave-устройств к Master с получением отклика последнего;

Последовательный интерфейс UART, обеспечивающий синхронный и асинхронный режимы работы. Асинхронные режимы должны быть полнодуплексными, поддерживать 7, 8 и 9 битные пакеты, возможность дополнения данных битом четности при передаче и контроля бита четности при приеме, поддерживать стандартные и широко используемые скорости передачи информации.

CAN-интерфейс

Интеграция в контроллер CAN-интерфейса позволит передавать сообщения с использованием широко распространенного в настоящее время CAN-протокола. Принятая в CAN-сети схема передачи сообщений обеспечивает широкие возможности при создании и модернизации системы, а также при подключении новых устройств. CAN использует многоступенчатый механизм исправления ошибок, что существенно повышает помехоустойчивость каналов передачи данных и цепей управления системы.

Параллельные порты ввода/вывода

Система на кристалле должна иметь несколько стандартных портов ввода/вывода. Оптимальным является совмещение входных линий АЦП с портом ввода цифровых данных, что позволит уменьшить общее количество выводов системы, и присутствие в составе системы квазидвунаправленных портов. Также су-

щественно сократить общее количество внешних выводов микросхемы позволит использование мультиплексной внешней шины, объединенной с параллельными портами ввода/вывода и задействование выводов стандартных портов под альтернативные функции, например, входные и выходные линии последовательных интерфейсов, ШИМ-контроллера, входов/выходов HSIO.

Модуль отладки OCDS

Модуль отладки в составе системы на кристалле необходим для существенного упрощения процесса отладки программного обеспечения. Модуль отладки должен поддерживать режимы пошаговой отладки, переход на указанный внешним отладчиком адрес, режим аппаратного сброса.

Аналоговые датчики

Аналоговые датчики проектируются или выбираются исходя из их назначения и рабочих условий эксплуатации. Уровни выходных сигналов датчиков практически не важны, т.к. они могут быть откорректированы и оптимизированы блоком усиления и нормализации сигналов. Особое внимание стоит обратить на стабильность их показаний при одинаковых условиях и разброс этих показаний по диапазону работоспособности датчика. В данном случае технологии производства датчиков не являются критичными и могут быть выбраны исходя из достижения оптимальных параметров.

Блок усиления и нормализации сигналов

Универсальность системы обеспечивается возможностью использования разнообразных датчиков с электрическими параметрами в широком диапазоне величин (напряжений, токов, сопротивлений и др.). По этой причине для обеспечения указанных возможностей в систему должен быть интегрирован блок усиления и нормализации сигналов.

Блок усиления и нормализации сигналов предназначен для совместной работы с аналоговыми датчиками с целью оптимизации характеристик выходного сигнала аналоговых датчиков и подгонке их к оптимальному диапазону работоспособности АЦП. Блок должен обеспечивать усиление слабого сигнала аналоговых датчиков до требуемого уровня, достаточного для выполнения качественного преобразования с помощью АЦП и приведение амплитуды сигнала к требуемой за счет усиления, ослабления, «притягивания» сигнала к диапазону преобразования АЦП. При разработке блока целесообразно использовать малошумящие операционные усилители с широким диапазоном коэффициента усиления, а сам блок должен обеспечить перестройку усиления. Оптимальным яв-

ляется реализация, в которой перестройка выполняется автоматически или с помощью управляющих сигналов системы.

Разработку блока усиления и нормализации целесообразно выполнять в составе системы на кристалле. Это позволит адаптировать выходные уровни блока к требованиям, предъявляемым к входным сигналам АЦП, позволит исключить «лишние» электрические компоненты входного тракта АЦП, необходимые для приведения уровней входных сигналов к требованиям АЦП, обеспечит целостность сигналов.

Крайне важным представляется обеспечение поддержки блоком усиления и нормализации работы с датчиками, имеющими пониженное напряжение питания и низкие уровни выходного сигнала, сопоставимые с утечками. Проектирование подобных структур с использованием стандартных библиотечных компонентов рекомендуется выполнять по методике, являющейся результатом научных исследований, описанных в источнике [1]. Данные исследования позволяют создавать устройства с пониженным напряжением питания, используя лишь имеющиеся базовые структуры (компоненты) стандартного технологического процесса производства, исключая необходимость применения специальных средств и дополнительных трудоемких и дорогостоящих технологических операций базовой технологии.

Интеллектуальные (цифровые) датчики

Использование интеллектуальных датчиков является хорошей альтернативой применению в системе аналоговых датчиков совместно с внешними или встроенным в систему на кристалле АЦП. Совместное применение интеллектуальных и аналоговых датчиков позволит существенно увеличить количество каналов регистрации показателей с незначительной нагрузкой на центральный процессор системы. Интеллектуальные датчики или датчики, осуществляющие оцифровку показаний должны обеспечивать передачу данных и сигналов по стандартным последовательным протоколам обмена.

Пример реализации системы

С целью отработки процесса проектирования, оптимизации производительности общей системы, ее потребляемой мощности, используемых системных ресурсов представляется целесообразной разработка макетного образца системы с использованием прототипа системы на кристалле (микроконтроллера) с учетом требований к универсальной системе регистрации и обработки данных.

Прототипом системы на кристалле могут послужить микроконтроллеры серии 1874 про-

изводства ОАО «НИИЭТ» [2], как наиболее подходящие под требования спецификации. Оптимальным выбором является микроконтроллер 1874BE96T.

Микроконтроллер 1874BE96T соответствует главным требованиям спецификации. Являясь современным 16-разрядным микроконвертером (МК) с усовершенствованной архитектурой MCS-96, эта интегральная схема включает в себя:

восемь 16-разрядных сигма-дельта АЦП, работающих с непрерывно меняющимися сигналами, каждый из которых управляется отдельно, имеет встроенный источник опорного напряжения, усилитель с регулируемым коэффициентом усиления с максимальным значением 38 дБ, способен работать в режиме дифференциального или несимметричного входа;

тип и объем внутренней памяти: память программ EEPROM – 16Кх16, ОЗУ – 2Кх8, расширенное ОЗУ – 2Кх8; интерфейсы; ШИМ; ЦАП.

Предусмотренный модуль отладки OCDS существенно упрощает процесс отладки пользовательского программного обеспечения и три режима энергосбережения. При использовании архитектуры МК 1874BE96T предполагаются следующие основные направления работ:

повышение производительности архитектуры прототипа;
увеличение объемов встроенной памяти;
увеличение общего количества каналов регистрации событий АЦП;
повышение быстродействия АЦП;
реализация модуля часов реального времени RTC и включение его в состав структурных блоков прототипа;
разработка и встраивание в архитектуры системы CAN-узла для обеспечения обмена данными системы на кристалле с внешними устройствами по CAN-протоколу;
оптимизация нагрузочных характеристик портов и снижение собственного тока потребления микросхемы.

Альтернативной указанному МК являются все микросхемы серии 1874 с похожей архитектурой, а также более производительные микроконтроллеры серии 1887. Блок-схема использования системы с различными датчиками и исполнительными механизмами представлена на рис. 3.

При реализации системы контроля параметров окружающей среды в качестве внешних датчиков концентрации газовых сред можно

использовать сенсоры, реагирующие на любые среды, например:

термокаталитический сенсор ТКС-2АМ, выпускаемых отечественным предприятием ОАО «Авангард»;

интеллектуальный датчик давления DMP 333i промышленного применения, цифровым интерфейсом передачи данных RS232, с блоком обработки и программируемой активной компенсацией характеристик чувствительного элемента;

датчик алкоголя и органических соединений TGS822;

термокаталитический датчик общего загрязнения воздуха TGS2600.

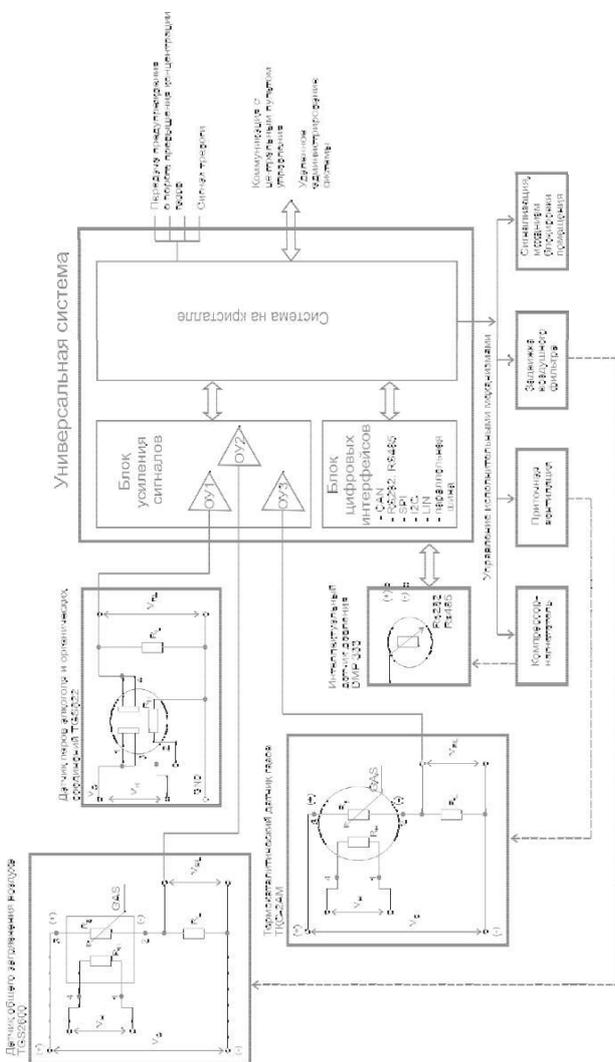


Рис. 3. Пример использования системы с различными датчиками и исполнительными механизмами

Сенсор ТКС-2АМ (рис. 4) предназначен для использования в приборах и системах газо-

вого анализа для определения концентрации углеводородов ряда метана, водорода, а также других горючих газов и паровоздушных смесей в атмосферном воздухе.

Основные достоинства сенсора, определившие его выбор: линейная функциональная зависимость выходного напряжения сенсора от концентрации газа. Позволяет выполнять преобразование показаний без введения дополнительной коррекции с использованием штатных средств системы на кристалле; выходное напряжение сенсора (милливольты) позволяет использовать сенсор без блока нормализации, подключив его напрямую к входам АЦП.



Рис. 4. Термокаталитический сенсор ТКС-2АМ

Основные параметры датчика представлены в таблице.

Технические характеристики термокаталитического сенсора ТКС-2АМ

Наименование параметра, ед. измерения	Значение параметра
Контролируемый газ	Углеводороды ряда метана, водород, пары бензинов, органических растворителей и др.
Диапазон преобразования % об.	0,1 - 3
Функциональная зависимость выходного напряжения сенсора от концентрации	Линейная
Напряжение питания, В	2,4 ± 0,1
Ток потребления, А	0,115 ± 0,005
Время прогрева не более, с	30
Время установки выходного сигнала, с	15
Чувствительность по метану, мВ/% об. CH ₄	не менее 17мВ при 1/% об. CH ₄
Изменение чувствительности сенсора в диапазоне температур: от минус 40 до плюс 60 0С, % не более	± 25
Изменение чувствительности сенсора в диапазоне относительной влажности: от 30 до 90 %, (% не более)	± 20
Изменение чувствительности сенсора после воздействия 3,5 % об. CH ₄ в течение 5 мин	± 15 %
Габаритные размеры, мм	
- диаметр	9,2 ± 0,1
- высота	19,5 ± 0,2
- длина выводов	11,5 ± 0,1

Интеллектуальный сенсор DMP333 (рис. 5а) имеет встроенный 16 разрядный АЦП, цифровой усилитель. Датчик передает данные и поддерживает программную калибровку и коррекцию показаний через цифровой интерфейс RS232 и может быть подключен с использованием указанного протокола к системе.

Датчики газов TGS822, TGS2600 (рис. 5б и 5в) и ТКС-2АМ являются термокатализическими, линейными устройствами и подключаются к аналоговому интерфейсу системы.

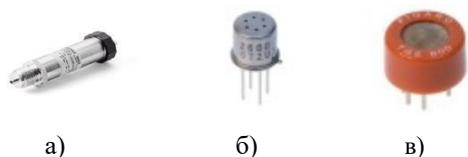


Рис. 5. Датчики: а - DMP333; б - TGS822; в - TGS2600

Для проверки работоспособности системы и отладки аппаратно-программной части собран макет системы мониторинга функциональных параметров человека. Микродатчики-регистраторы под управлением микроконтроллера 1874BE96Т располагаются на теле человека. Для контроля основных физиологических показателей человека достаточно регистрировать ЭКГ, пульс, температуру и артериальное давление. В качестве стандартного шлюза для передачи и обработки регистрируемой информации в удаленную базу данных были использованы средства персональной коммуникации (смартфон, планшетный компьютер). Смартфон создает точку доступа WiFi и находится в непо-

средственной близости от человека (соответственно и от микродатчиков-регистраторов). Микродатчики-регистраторы в автоматическом режиме подключаются к смартфону и передают по радиоканалу собранную и предварительно обработанную (фильтрация, компрессирование) информацию. Разработанное программное обеспечение (ПО), устанавливаемое на смартфоне под управлением операционной системы Android 5.0 проводит окончательную обработку данных (сравнение с эталонными значениями, выявление отклонений от нормы), вывод результатов диагностики на экран и обеспечивает передачу данных в конкретное "облачное" хранилище через глобальную сеть Internet. Также ПО позволяет в любой момент подключиться к "облачной" базе данных и просмотреть на экране смартфона результаты диагностики в отложенном режиме.

Концептуальная модель разработанной системы предполагает использование блочно-модульного принципа построения, что позволяет формировать её иерархический состав гибко и просто в зависимости от задач применения.

Литература

1. Эквивалентная схема МОП-транзистора с электрически соединенными затвором и карманом [Текст] / А. В. Русанов, А. Ю. Ткачев, Ю. С. Балашов // Известия высших учебных заведений. Электроника. - 2014. - № 1 (105). - С. 85-86 : схема, граф. - Библиогр.: с. 86 (3 назв.). - ISSN 1561-5405
2. 16-разрядный микроконвертер [Электронный ресурс] : Режим доступа : World Wide Web. URL : <http://www.niiet.ru/chips/microconvertors/>

Воронежский государственный технический университет ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж

THE CONCEPT TO CREATE A VERSATILE PARAMETER MONITORING SYSTEM

D.V. Zhuravlev, Candidate of Technical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ddom1@yandex.ru

Yu.S. Balashov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: faddey52@mail.ru

D.V. Shekhovtsov, Candidate of Technical Sciences, ОАО "НИИЕТ", Voronezh, Russian Federation, e-mail: wex@niiet.ru

The monitoring system developed is a control and technical complex to collect, transfer, process, store, output and strategically analyze data. This article considers a conception model the system of interest involving a block-module system structure. This enables forming a hierarchical structure in a flexible, simple, and application-dependent way. The ways to implement a signal recording unit for a versatile system to monitor various parameters are considered. The basic components of the re-

ording unit are reviewed. Their functional tasks are described. The main software-driven part of the versatile system is implemented within the SoC (System on Chip) integrated circuits. Systems on Chip development steps are determined. The SoC block diagram derived from the system decomposition is shown. The architecture features of the SoC basic blocks are described. The controlled recording unit operation is shown based on the 1874VE96T microcontroller. A system operation in conjunction with various sensors and actuators is demonstrated

Key words: monitoring, remote control, universal system, system on chip, decomposition of the project

References

1. Rusanov A. V., Tkachev A. Ju., Balashov Ju. S. Jekvivalentnaja shema MOP-tranzistora s jelek-tricheski soedinennymi zatvorom i karmanom [The equivalent circuit of MOSFET with electrically connected gate and pocket] // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronika. 2014; № 1 (105); P. 85-86
2. 16-razrjadnyj mikrokonverter [16-bit MicroConverter] [electrody resource] : Access mode : World Wide Web. URL : <http://www.niiet.ru/chips/microconvertors/>

ВРЕМЯ ВЫДЕРЖКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ СВАРКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНА

М.В. Семенович, В.В. Пешков

Приведены расчетные зависимости определения оптимального времени выдержки заготовок из титана под давлением при их сварке.

Исследовано влияние механических характеристик титановых сплавов на состояние ползучести и пластичности в зоне контакта соединяемых заготовок, а также на время технологического процесса. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований, позволивших установить механические константы титановых сплавов и составить математические модели материалов ОТ4-1 и ВТ6. С использованием полученных моделей установлено влияние параметров технологического процесса сварки заготовок (температура, давление) на время, необходимое для получения качественного соединения.

Выполнено исследование напряженно-деформированного состояния в упругопластической области материала соединяемых заготовок в непосредственной близости от контактной зоны.

Выявлены кинематика вдавливания элементов конструкции и зависимость величины деформации металла от соотношения размеров заготовок. Показана зависимость вертикального перемещения металла листа от времени в точке, соответствующей центру заполнителя, и ее прямо пропорциональное увеличение со временем испытания.

Полученные результаты необходимы для оптимизации технологических процессов сварки заготовок из титановых сплавов

Ключевые слова: ползучесть, время, давление, деформации, напряженно-деформированное состояние, сварка

Процесс диффузионного соединения заготовок из титановых сплавов происходит в условиях пластических деформаций приконтактных слоев металла, а также деформаций ползучести. Это указывает на важность обеспечения пластического состояния приконтактных слоев соединяемых элементов (листов обшивки и заполнителя) и такого параметра, как время выдержки заготовок под давлением. В связи с этим разработка титановых сплавов с высокой ползучестью является актуальной проблемой [1].

В работе [2] при рассмотрении схемы поля скоростей и годографа деформаций процесса вдавливания заполнителя в обшивку получены зависимости, определяющие необходимое время выдержки заготовок под давлением при определенной температуре, обеспечивающее высокое качество соединения.

В соответствии с [3] состояние кратковременной ползучести материала – эквивалентная скорость суммарной деформации $\dot{\epsilon}$:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ – эквивалентные скорости деформации пластичности и деформации ползучести.

Состояние ползучести можно выразить уравнениями [3]:

$$\dot{\epsilon}_2 = B \dot{\epsilon}_1^n,$$

Семенович Максим Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 246-55-45
Пешков Владимир Владимирович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 246-55-45

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = B \dot{\epsilon}_1^n = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_1$ – эквивалентные напряжение и деформация соответственно,

A, B, m, n – константы материала,

t – время процесса ползучести.

При $n = 0$ – жестко-пластическое состояние, при $m = 0$ – ползучесть.

Предел текучести и модуль упрочнения сплава ОТ4-1 для билинейной диаграммы «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» составляли 14 и 17 МПа соответственно.

Модуль упругости зависит от температуры нагрева заготовки и для сплава ОТ4-1 при температуре $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ можно определить экстраполяцией данных, приведенных в [2], в область температур сварки, его величина $E = 50000$ МПа.

В работе [2] предлагается состояние свариваемости оценивать как

$$\sigma = \sigma / A_{\text{П}},$$

где $0 \leq \sigma \leq 1$; $0 \leq t \leq t_K$.

Полная свариваемость будет достигнута при $\sigma = 1$,

$$\sigma = (B \dot{\epsilon}_1^n t_0 \dot{\epsilon}_1) / A_{\text{П}} = 1,$$

где t_0, σ – граничные значения.

Необходимое время технологического процесса

$$t_{\text{ОН}} = (A_{\text{П}} A \frac{1}{\dot{\epsilon}_1^m}) A^{(1-n)} B \frac{1}{\dot{\epsilon}_1^{(1-n)m}}$$

При задании условия полного снятия напряжений при выдержке соединяемых элементов (листы обшивки и заполнитель) в условиях постоянной деформации (полная релаксация на линиях разрыва), то из уравнения (2) получим

1 мм

$$t \approx B^1 A^{n \cdot \Delta} (3) \overline{1 \text{ мм}}$$

Для определения механических характеристик, необходимых при разработке математических моделей материалов элементов конструкции, из заготовок (материалы ОТ4-1, ВТ6) в виде листов (ГОСТ 1497-84) вырезали образцы для испытаний длиной рабочей части 80 мм и шириной 20 мм и наносили координатную сетку размером 15x15 мм. На испытательной машине Р-10 осуществляли одноосное растяжение образцов. С помощью нагревательного устройства образцы нагревали до температур 700, 800, 900 и 1000°C. Далее, по окончании испытаний по изменению размеров ячеек сетки и вычисляли величины деформаций. По результатам экспериментов получены значения констант титановых сплавов, которые приведены в таблице.

Константы материалов

	T °C	700	800	900	1000
ОТ4-1	m	0,042	0,037	0,03	0,026
ОТ4-1	A	120	85	64	51
ВТ6	m	0,044	0,04	0,031	0,029
ВТ6	A	123	87	65	54

Модели материалов использовались при вычислениях пластических деформации и деформации ползучести. На рис. 1 приведены расчетные зависимости давления и времени соединения заготовок.

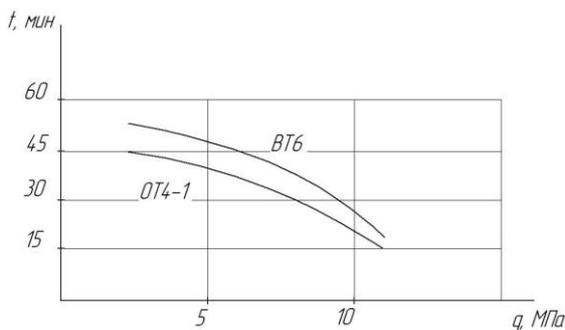


Рис. 1. Изменение необходимого времени выдержки от давления

Исследование напряженно-деформированного состояния в упругопластической области материала заготовок выполнено в непосредственной близости от контактной зоны соединяемых заготовок.

Установлено, что при $T = 900^\circ\text{C}$ в процессе соединения происходит вдавливание элементов конструкции, и величина деформации металла зависит от соотношения размеров заготовок δ_0/δ_3 (δ_0, δ_3 – толщины листа обшивки и заполнителя соответственно). При этом, например, зависимость вертикального перемещения металла листа от времени в точке (рис. 2), соответствующей центру заполнителя, при $\delta_0/\delta_3 \geq 3,3$ – увеличивается прямо пропорционально времени испытания ($\delta_0 = 1,0$ мм).

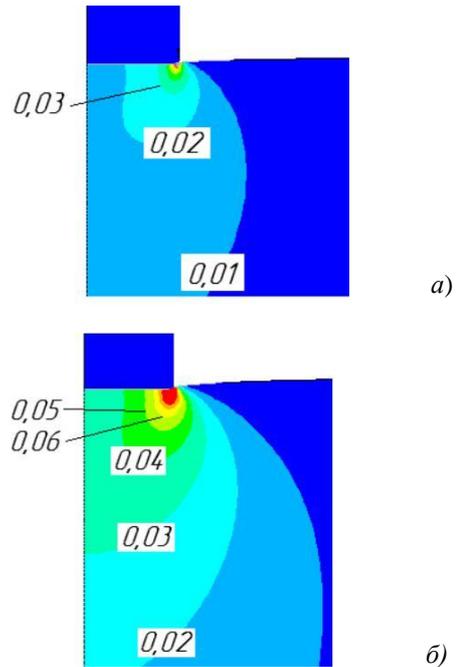


Рис. 2. Эквивалентные деформации в области контакта заполнителя и листа обшивки: а) $t = 1800$ с; б) $t = 3600$ с

Расположенная под заполнителем зона в нижней части листа обшивки, характеризуется минимальными перемещениями материала в течение всего процесса соединения.

Величина вертикальной деформации листа обшивки зависит от δ_0/δ_3 возрастает по мере перемещения от центра заполнителя к его краю. Наибольшая деформация наблюдается в зоне концентрации напряжений под краем заполнителя. Пластическое течение материала в этой области приводит к перемещению материала в сторону заполнителя и последующему затягиванию вместе с ним вниз под действием силы трения.

Зона, расположенная под заполнителем в нижней части обшивки вблизи плоскости ее контакта, характеризуется минимальными перемещениями материала в течение всего процесса соединения.

Таким образом, получены зависимости, определяющие необходимое время выдержки заготовок из сплавов ОТ4-1 и ВТ6 под давлением при определенной температуре, обеспечивающее высокое качество соединения.

Литература

- Хорев, А.И. Разработка листового титанового высокотемпературного сплава ВТ38, применяемого при температурах до 700°C [Текст] / А.И. Хорев // Вестник машиностроения. - 2014. - №5. С. 67-69.
- Чудин, В.Н. Соединение элементов корпусных конструкций давлением [Текст] / В.Н. Чудин // Вестник машиностроения. - 2014.- №1. С. 78-80.
- Работнов, Ю.Н. Кратковременная ползучесть [Текст] / Ю.Н. Работнов, С.Т. Милейко – М.: Наука, 1970. – 234 с.

DELAY TIME UNDER PRESSURE WHEN IS WELDING TITANIM WORKPIECES

M.V. Semnozhenkov, Candidate of Technical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: for_maxs@mail.ru

V.V. Peshkov, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: for_maxs@mail.ru

Were given calculated dependences definitions of hold time of workpieces from the titan under their pressure welding. Have been researched the influence of the mechanical characteristics of titanium alloys ductility and creep state in the contact zone the workpieces being joined, as well as the technological process. Were given the method and results of experimental studies, which allowed to establish the mechanical constants of titanium alloys and create mathematical models and materials OT4-1 VT6. Using the obtained models established the influence of process parameters of welding workpieces (temperature, pressure) for the time necessary to obtain a high-quality connection.

Conducted study of stress-strain states of material in the field of elastic-plastic joining workpieces in the vicinity of the contact zone.

Revealed the kinematics indentation of structural elements, and the dependence of the deformation of the metal from a ratio of sizes of workpieces. Shows the dependence of the vertical movement of the metal sheet from a time point corresponding to the center of the filler, and it is directly proportional to the increase in test time.

Obtained results are necessary for optimization of technological processes of welding workpieces made of titanium alloys.

Key words: creep, time, pressure, deformation, stress-strain state, welding

References

1. Horev, A.I. Razrabotka listovogo titanovogo vysokotemperaturnogo splava VT38, primenjaemogo pri temperaturah do 700°C [Designing sheet high temperature titanium alloy VT38 used at temperatures up to 700°C] / A.I. Horev / Vestnik mashinostroeniya, 2014. - №5. S. 67-69.
2. Chudin, V.N. Soedinenie jelementov korpusnyh konstrukcij davleniem [Joining of elements of hull structures by pressure] / V.N. Chudin / Vestnik mashinostroeniya, 2014. - №1. S. 78-80.
3. Rabotnov, Ju.N. Kratkovremennaja polzuchest' [Short-term creep] / Ju.N. Rabotnov, S.T. Milejko – M.: Nauka, 1970. – 234 s.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ПЕРЕХОДНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, В.И. Котуков

В статье рассмотрен процесс получения плавных сопряжений элементов деталей, изготавливаемых с применением гидроабразивного метода в токопроводящей жидкой среде при действии внешнего электрического поля. Показаны возможности разработанного комбинированного метода для чистовой обработки профиля пера лопаток авиационных и ракетных двигателей.

Проблема получения с заданной точностью окончательного профиля сопрягаемых участков поверхностей решена путем использования комбинированной струйной гидроабразивной обработки с анодным удалением с поверхности разделения припуска, достаточного для снятия шаржированного слоя. Из теории электрохимической размерной обработки известно, что скорость съема материала анодным растворением будет выше на концентраторах поля, которыми являются микронеровности, поэтому наложение электрического поля способствует также снижению шероховатости. Одновременно происходит удаление продуктов обработки и восстановление режущих свойств абразива. Это приводит к стабилизации процесса разделения металла, повышает качество обработанной поверхности, производительность, увеличивает срок службы инструмента, дает возможность значительного снижения себестоимости обработки. Однако полученные ранее результаты не обеспечивают достижения требуемых технологических показателей при чистовой размерной обработке сложнопровильных поверхностей типа лопаток турбин и компрессоров, турбонасосных агрегатов. Для этого требуется установление закономерностей для управления струей и создание механизма перемещения струи по поверхности зоны обработки, описание которой обычно задано табличным методом последовательным сочетанием точек. При проектировании режимов комбинированной обработки для каждой точки необходимо назначение параметров, учитывающих геометрию обрабатываемого участка детали и положение струи жидкости.

Современные конструкции наукоемкой транспортной техники содержат большое количество элементов, к которым прямой доступ металлорежущего инструмента ограничен. Для их чистовой обработки требуется создание новых технологических способов и устройств, рассматриваемый в статье комбинированный процесс решает эту проблему и значительно расширяет технологические возможности изготовителей перспективной продукции машиностроения

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, сопряжение, переходные участки, механизм формообразования

Введение

При размерной обработке деталей возникает необходимость формирования точных переходных участков. К ним относятся скругления кромок лопаток газотурбинных двигателей с большими углами закрутки. Применяемые методы изготовления кромок и мест сопряжения лопаток турбонасосных агрегатов весьма трудоемки и нестабильны. Струйные методы, к которым относится комбинированная гидроабразивная обработка, позволяют перейти от строчечного метода с последовательным формированием отдельных, в основном доступных для инструмента участков детали, к дистанционному формообразованию поверхностей любого профиля, а наличие электрического поля открывает возможность полностью исключить шаржирование и выполнять чистовые операции для деталей с любой геометрией, в

том числе с участками, скрытыми внутри изделия.

Образование сопряжений на переходных участках деталей

Из [1] известно, что при управлении съемом металла по времени обработки на переходных участках заготовок образуется скругление кромок.

Для прямых углов ($\alpha = 90^\circ$) радиус скругления в период обработки (обычно не более нескольких минут) может достигать 1 мм. Зная закономерности изменения радиуса скругления, можно управлять получением требуемого радиуса по времени, т.е. получить совершенно новый технологический результат – управляемое формообразование точных сопряжений из произвольного начального профиля заготовки. Это актуально для лопаток авиационных и ракетных двигателей, где кромки могут иметь большую закрутку, и изготовление таких поверхностей струйным методом дает значительный экономический эффект.

Кириллов Олег Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук,
доцент, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук,
профессор, тел. 8-903-655-99-70, e-mail:
ysmolen@inbox.ru

Котуков Василий Иванович – ВГТУ, аспирант, e-mail:
fgupvmz@mail.ru

Такие операции могут достаточно просто выполняться на станках для комбинированной гидроабразивной обработки путем разделения профиля заготовки на мерные участки, составляющие часть длины [2] сложного геометрического профиля на поверхности обработки.

Применение метода траекторных преобразователей для создания управляющих программ

В [3] в основу создания управляющих программ положены принципы подобия [4] и аналогового моделирования с использованием электрических воздействий (например, через эквивалентное сопротивление). Такой параметр входит во все режимные показатели методов обработки с наложением электрического поля. В [3] предлагается для построения траектории перемещения инструмента (в нашем случае электрода) использовать кривые Лиссажу, т.е. замкнутые движения точки в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что позволяет описать координаты в любой системе проектирования перемещений с учетом длины струи и расстояния между инструментом и зоной обработки (при малых расстояниях это межэлектродный зазор). Аналогом такой системы является автоматическое управление струей, или известные системы управления электронным и световым лучом при разделении заготовок из листовых материалов.

В [3] предлагается описание траекторий движения инструмента выполнять системой однопараметрических уравнений, дающих достаточно полное представление об их геометрических и аналитических свойствах. В прямоугольной системе координат (x, y) управляемые координаты x, y :

$$\begin{aligned} x &= R \cos(\omega t) \\ y &= R \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (1)$$

где R - расстояние до точки касания поверхности струей в системе отсчета от начала координат;

(x, y) - амплитуды гармоник

-го

порядка;

слагаемых;

- независимый текущий параметр

ω - частота гармоник; t - время;

- начальное значение параметра;

- количество автономных участков.

Рассмотренная специфика

формирования системы управления процессами обработки деталей при комбинированной чистой гидроабразивной обработке на станках с ЧПУ показывает, что использование для этой цели стандартных программных продуктов, предназначенных для механической обработки, охватывает лишь часть управляющих действий, в основном тех, где отсутствие прямого контакта инструмента с заготовкой не оказывает значительного влияния на формообразование.

Методы траекторных преобразователей позволяют учесть не только геометрические параметры, но и аналитические факторы, определяемые режимами электрического поля и гидродинамическими особенностями, влияющими на технологические показатели электрических методов обработки.

Траектория струи относительно обрабатываемой поверхности

Движение струи должно повторять перемещение при гидроабразивной обработке пятна контакта инструмента с заготовкой. Для сложнопрофильных поверхностей это аналог строчечной схемы, приведенной в [5], которая применяется для обработки сопряжений по профилю пера одиночных лопаток и их кромок. К сожалению, такая схема непригодна для цельных колес лопаточных машин и каналов гидроаппаратуры, где требуется односторонний подвод инструмента, например, в форме рабочей струи с минимальной зоной контакта с заготовкой, площадь которой зависит от допуска на профиль детали.

Для обработки сложнопрофильных поверхностей требуется поворот заготовки, что изменяет скорость съема припуска, угол поворота струи, и вызывает появление дополнительных погрешностей.

На рис. 1 показано изменение этих параметров.

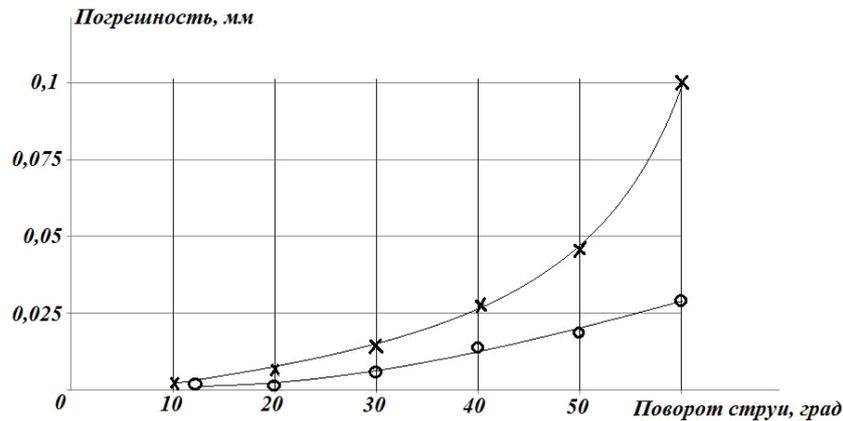


Рис. 1. Величина погрешности за счет поворота струи относительно вертикали. Расстояние от среза сопла: 1 – 10 мм (xxx); 2 – 5 мм (ooo). Материал – ВД17. Давление струи 415 МПа. Напряжение 300 В. Абразив – отбеленный чугун

Как видно из рис. 1, погрешности, связанные с изменением вектора струи, могут возрастать на порядок, если при этом зона обработки удаляется от среза сопла. Такое удаление объективно необходимо, если зона обработки (например, кромки лопаток) углублена в деталь. Поэтому для чистовой обработки сложнопрофильных поверхностей желательно закладывать такую кинематику перемещения деталей, чтобы за счет этого фактора было минимальное изменение угла атаки и расстояния между срезом сопла и точкой воздействия оси струи.

Как показано в [6], удаление зоны обработки желательно иметь до 50-60 мм, что

не всегда возможно при чистовой обработке. Эффективным методом повышения скорости съема и снижения шероховатости является управление процессом путем изменения доли анодного удаления припуска, что для размерной обработки исследуется впервые.

Параметрическая связь между вектором струи и геометрией сложнопрофильных поверхностей детали

На рис. 2 показана схема перемещения струи при обработке сложнопрофильных поверхностей и формирование зоны обработки.

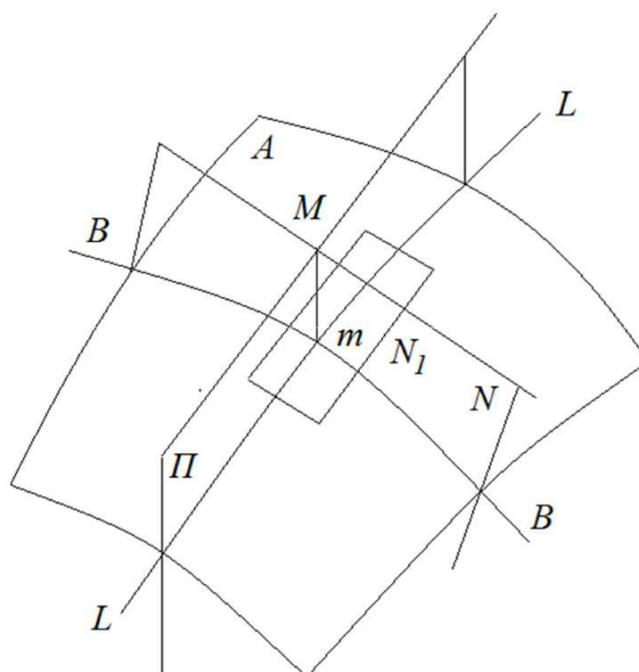


Рис. 2. Схема перемещения струи при обработке сложнопрофильных поверхностей: m – точка контакта струи с обрабатываемым участком; M – срез сопла для подачи рабочей среды; L-L, B-B – образующие обрабатываемой поверхности; N, П, N₁ – плоскости в зоне обработки

На рис.2 поверхность А обрабатывается при перемещении струи по нормали М и траектории L-L, образуя строку. Движение происходит за счет перемещения поверхности А сначала по L-L, затем с перестановкой на шаг В-В. Продольная секущая плоскость N пересекается в точке m с нормальной плоскостью N₁, образуя вектор струи mМ. Очевидно, что при любой геометрической форме поверхности А точка m контакта струи всегда будет на нормали mМ при пересечении плоскостей N и N₁.

В декартовой системе координат ось x характеризует продольное движение струи (по L-L на рис. 3), y – поперечное (по В-В на рис. 3), z – по направлению движения струи (mМ на рис. 3).

Перемещение обрабатываемой поверхности происходит: поворотом относительно x-x с управлением по углу d/d , где d – угол поворота относительно x-x, касательной к L-L, d – текущее время; относительно y-y – d/d ; путем прямолинейного перемещения по dx/d ; dy/d ; dz/d .

Обработка струей произвольной поверхности возможна, если управлять всеми перемещениями в реальном масштабе времени.

При перемещении струи вдоль L-L (рис.3) следует обеспечить управление ее вектором по минимальному количеству управляющих параметров.

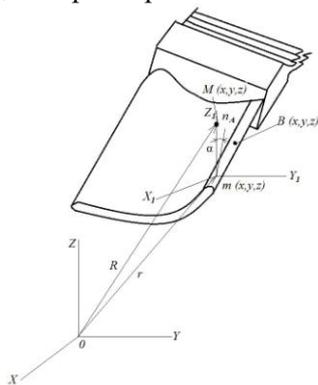


Рис. 3. Схема расчета расстояния от среза сопла до точки контакта оси струи с местом обработки на кромке лопатки турбины: x, y, z-неподвижная система координат; x₁, y₁, z₁ -подвижная система координат; R, r – радиусы-векторы точек М и m

Если закрутка детали незначительна, то возможно при обработке для каждой строки перемещения струи в качестве управляющих параметров сохранить d/d и dz/d , dx/d , или даже только dz/d , dx/d , если поворот детали d/d выполнять в конце строки на угол изменения положения касательной на отрезке между соседними строками.

Тогда общую закономерность управления строками можно записать системой

$$d/d = 0; d/d = 0; dx/d = 0; dz/d = 0 - \text{1-ая строка}$$

$dy/d = 0; d/d = 0$ – переход на следующую строку

$$d/d = 0; d/d = 0; dx/d = 0; dz/d = 0 - \text{следующая строка}$$

... ..

Если закрутка детали значительная (для больших лопаток ГТД и энергетических машин она может быть 90° и больше), то в систему необходимо добавить для каждой строки d/d и можно исключить при переходе на строку d/d .

Кинематика точки m касания струи включает несколько видов перемещений, где абсолютная скорость v_0 складывается из переносной v_1 и относительной v_2 :

$$v_0 = v_1 + v_2 \quad (2)$$

Таким образом, при движении точки соприкосновения струи относительно сложнопрофильной поверхности траектория может быть однозначно получена как синтез отрезков с абсолютной скоростью, что позволяет спроектировать программу автоматизированной чистовой обработки комбинированным методом.

Граничным условием модели перемещения вектора оси струи является условие

$$\cos v_0 = \frac{v_0 \overline{mM}}{|v_0|} = \frac{1}{2}, \quad (3)$$

где \overline{mM} - единичный вектор кривой L-L движения струи; ν_0 mM - угол между векторами ν_0 и \overline{mM} .

Для получения минимальной погрешности при чистовой обработке необходимо иметь параметры состояния положения струи к абсолютному перемещению обрабатываемой детали, близким к $\frac{1}{2}$.

Заключение

Разработан механизм формирования геометрии переходных участков на примере чистовой обработки профиля пера лопаток авиационных и ракетных двигателей, имеющих наиболее сложную форму, описываемую табличным методом по точкам, характеризующим профиль. Приведен анализ чистовой обработки возможных поверхностей с учетом влияния на точность профиля допущений, принятых при разработке программного продукта. Показано, что при использовании современного оборудования для комбинированной обработки погрешность программирования (в том числе при табличном методе задания профиля детали)

незначительна. Это позволяет автоматизировать чистовую обработку большинства сложнопрофильных поверхностей при использовании гидроабразивного комбинированного метода.

Литература

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов [Текст] : Учеб. пособие (в 2-х томах.). Т. II/Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк., 1983. – 208 с.
2. Смоленцев, В.П. Формирование поверхностного слоя при гидроабразивном разделении металлов с наложением электрического поля [Текст] / В.П. Смоленцев, Е.В. Гончаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. - Т. 7. - №7. – С.74-77.
3. Рази А.А. Тракторные преобразователи [Текст] / А.А. Рази. Л.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
4. Безъязычный В.Ф. Метод подобию в технологии машиностроения [Текст] / В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2012.-320 с.
5. Юнусов Ф.С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием [Текст] / Ф.С. Юнусов. М: Машиностроение.1987.-248 с.
6. Смоленцев В.П. Комбинированное разделение заготовок гидроабразивным методом [Текст] / В.П. Смоленцев. Е.В. Гончаров, В.И. Котуков // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. М.: Спектр, 2014. Т. 3.- С.118-172.

Воронежский государственный технический университет

GEOMETRY GENERATION PROCESS OF TRANSITION SECTIONS DURING COMBINED TREATMENT

O.N. Kirillov, Doctor of Engineering Science, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

V.P. Smolentsev, Doctor of Engineering Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: vsmolen@inbox.ru

V.I. Kotukov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: fgupvmz@mail.ru

Process of getting parts mating, manufactured with use of hydroabrasive method in current-conducting fluid medium during effect of external electric field is viewed in the article. Capabilities of developed combined method for finish machining of airfoils of aircraft and rocket engines are presented.

The problem of getting with required accuracy final airfoil of mating surfaces areas was decided with the use of combined hydroabrasive-jet treatment with anodic removal from surface of separation tolerances, sufficient for removal of overact layer. From the theory of dimensional electrochemical machining it is known that speed of material removal with use of anodic dissolution will be higher on concentrators of the field, which are microroughnesses. That is why, application of the electric field helps to reduce roughness. Removal of waste products and recovery of abrasive cutting properties is performed simultaneously. This leads to stabilization process of metal separation, improve quality of machined surface, performance, improve tool life, makes it possible to reduce cost of machining. However, previously obtained results don't provide achievement of required technological parameters during finish dimensional machining of surfaces, type turbine and compressor airfoils, turbo pump assemblies. It is required to establish regularities for jet control and create jet moving process through the surface working area. Description of the surface working area is usually prescribed by table method, consecutive combination of points. It is necessary to establish parameters for each point during designing of combined machining mode. Parameters must to take into account geometry of machined area of the detail and position of fluid jet.

Modern structures of high technology transport products are contain a lot of elements, to which direct access of metal cutting tool is limited. It is necessary to create new technological methods and devices for finish machining. Combined process decides this problem and increase technological opportunities for manufacturers of future products in the article presented here

Key words: hydroabrasive treatment, mating, transition sections, geometry generation process

References

1. Jeletrofizicheskie i jeletrohimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical treatment methods of materials]: Ucheb. posobie (v 2-h tomah.). T.II/Pod red. V.P. Smolenceva. M.: Vyssh. shk., 1983. – 208 s.
2. Smolencev V.P. Formirovanie poverhnostnogo sloja pri gidroabrazivnom razdelenii metallov s nalozheniem jelektricheskogo polja [Generation of surface layer during hydroabrasive separation of metals with application of the electric field]/ V.P. Smolencev, E.V. Goncharov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 2011, Tom 7 №7. – S.74-77.
3. Razi A.A. Traektornye preobrazovateli [Trajectory transducers]/ A.A. Razi. L.: Mashinostroenie, 1984. – 192 s.
4. Bez'jazychnyj V.F. Metod podobija v tehnologii mashinostroenija [Similarity method in technology of machine building]/ V.F. Bez'jazychnyj. M.: Mashinostroenie, 2012.-320 s.
5. Junusov F.S. Formoobrazovanie slozhnoprofil'nyh poverhnostej shlifovaniem [Generation of geometrically-complex surfaces by grinding]. M: Mashinostroenie.1987.-248 s.
6. Smolencev V.P. Kombinirovannoe razdelenie zagotovok gidroabrazivnym metodom [Combined separation of semi-finished products by hydroabrasive method]/ V.P. Smolencev. E.V. Goncharov, V.I. Kotukov. Progressivnye mashinostroitel'nye tehnologii, oborudovanie i instrumenty. Moskva. Spekr.2014. tom 3.- S.118-172.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕДНОМАТРИЧНОГО НАНОСТРУКТУРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Ю.Р. Копылов, Ю.А. Щетинин, О.В. Горожанкина

К конструкционным материалам, применяемым в ракетостроении для изготовления «горячих агрегатов» (камер сгорания, газогенераторов, теплообменников), предъявляются высокие требования по теплопроводности, жаропрочности и жаростойкости. В настоящее время указанным требованиям отвечают жаропрочные бронзы в сочетании с теплозащитными покрытиями, например сплавы Narloy Z, бронзы БрХЦрТ или БрХ08, которые обеспечивают съем теплового потока до $36 \cdot 10^6$ ккал/м² час. Для разрабатываемых новых ракетных двигателей необходим новый конструкционный материал с повышенной теплопроводностью при сохранении его механических характеристик. Наиболее перспективным материалом является чистая медь, с введенными в ее металлическую матрицу углеродными наноразмерными частицами (нанотрубки, фуллерены), что позволяет существенно увеличить жаропрочность.

В данной статье впервые детально описаны технология получения, структура и свойства композита с массовой долей УНТ 0,5%, полученного методом механического легирования. Для сравнения приведены свойства образца из медного порошка ПМС-1 без добавления углеродных наночастиц. Для механического легирования использовали планетарную мельницу «Пулверизетте-5» (FRITSCH). Процесс легирования осуществлялся в течение 30 мин, при этом происходил разогрев капсул с композицией до 60-80 °С. Далее проводилась термообработка в вакууме и отжиг композиции. Предварительное прессование осуществлялось в стальной капсуле усилием 100 тс, в результате была получена цилиндрическая заготовка. Далее было проведено горячее изостатическое прессование (ГИП) в газостате QVINTUS-250. Для механических испытаний изготавливались цилиндрические образцы с толщиной рабочей части 5 мм.

Результаты прочностных испытаний показали, что предел текучести композита после ГИП на ~11% превышает аналогичный показатель образца ПМС-1 (без легирующих частиц) и в 2 раза превышает предел текучести меди марки М2. Теплопроводность исследуемого образца композита составила 289 Вт/м·К, что на ~20% превышает теплопроводность традиционно используемой бронзы БрХ08 (239 Вт/м·К). Полученные результаты показывают принципиальную возможность получения медного композиционного материала, упрочненного наноразмерными частицами углерода – УНТ методом механического легирования, однако имеется необходимость уточнения технологии его получения

Ключевые слова: нанокompозит, медь, механические свойства, термообработка

Одна из основных задач современного ракетостроения состоит в обеспечении заданного уровня температур различных элементов жидкостных ракетных двигателей. К конструкционным материалам, применяемым для изготовления «горячих агрегатов» (камер сгорания, газогенераторов, теплообменников), предъявляются следующие требования: высокие теплопроводность, жаропрочность и жаростойкость. В настоящее время указанным требованиям отвечают жаропрочные бронзы в сочетании с теплозащитными покрытиями. На текущий момент в мировой практике для этих целей применяются сплавы Narloy Z, из отечественных сплавов – бронзы БрХЦрТ или БрХ08, которые обеспечивают съем теплового потока до $36 \cdot 10^6$ ккал/м² час. Увеличение скорости истечения и температур продуктов

сгорания, особенно в многофазовых двигателях, приводит к нарушению теплозащитных покрытий, сквозным пролизам охлаждаемых стенок сгорания и, как следствие, отказам двигателей, что является ограничением в их дальнейшем применении для новых ракетных двигателей.

Для увеличения эффективности теплообмена необходима разработка нового конструкционного материала с повышенной теплопроводностью при сохранении его механических характеристик. Наиболее перспективным материалом является чистая медь, имеющая высокую теплопроводность, но не обладающая достаточной жаропрочностью, так как способна пластически деформироваться при относительно низких напряжениях и при температурах порядка 0,4-0,5 от температуры плавления. Введение в металлическую матрицу углеродных наноразмерных частиц (нанотрубки, фуллерены) позволит существенно увеличить жаропрочность [1-3].

Для создания образцов наноструктурного композиционного материала (НКМ) в качестве

Копылов Юрий Романович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: urkopulov@mail.ru

Щетинин Юрий Александрович - ВГТУ, аспирант, e-mail: yurii.kbxa@mail.ru

Горожанкина Ольга Владимировна - ВГТУ, старший преподаватель, e-mail: winter.07@mail.ru

матрицы применялась порошковая медь ПМС-1 (соответствует ГОСТ 4960-75 [4], фракция менее 40 мкм). В качестве упрочняющих частиц были выбраны малослойные углеродные нанотрубки (УНТ) в виде полидисперсного порошка (представляет собой углеродные наномасштабные, квазидномерные, нитевидные образования поликристаллического графита преимущественно цилиндрической формы с внутренним каналом). Наружный диаметр трубок составляет $20 \div 40$ нм, внутренний – $5 \div 10$ нм, длина более 2000 нм. На рис. 1 представлен снимок УНТ, полученный с помощью просвечивающего электронного микроскопа.

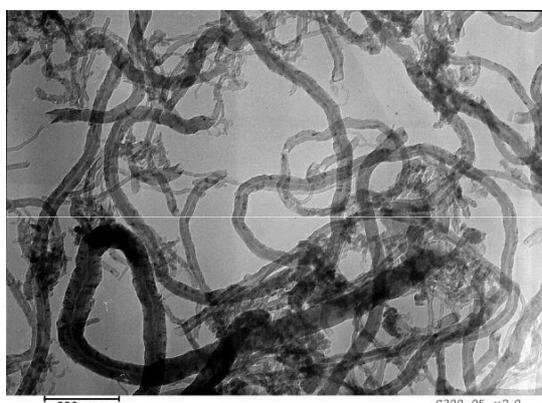


Рис. 1. Малослойные углеродные нанотрубки

В данной статье впервые детально описана технология получения, структура и свойства композита с массовой долей УНТ 0,5%. Масса медного порошка ПМС-1 составляет 4000 г, масса УНТ – 20 г. Для сравнения приведены свойства образца из медного порошка ПМС-1 без добавления углеродных наночастиц.

Для механического легирования использовали планетарную мельницу «Пульверизетте-5» (FRITZSCH). Принцип работы планетарной мельницы состоит в том, что измельчаемый материал дробится и растирается измельчающими шарами размольных стаканов. На содержимое размольного стакана, состоящее из измельчаемой массы и мелющих шаров, действует как центробежная сила вращения стаканов вокруг их собственной оси, так и центробежная сила вращающегося опорного диска. Так как направления собственных вращений размольных стаканов и опорного диска противоположны друг к другу, центробежные силы действуют то в одинаковом, то в противоположном направлениях. При этом происходит процесс перекачивания мелющих шаров по внутренней

кромке стакана (измельчение осуществляется трением) и затем отрыв и свободное движение шаров и измельчаемого материала через размольный стакан с последующим ударом о противоположную внутреннюю стенку (ударное воздействие). Благодаря результирующей центробежной силе мелющие шары достигают 40 – кратного ускорения силы тяжести. Использование размольного стакана с фторопластовым уплотняющим кольцом позволяет предотвратить потери материала также при измельчении его в виде суспензии. С целью равномерного распределения УНТ по объёму медного порошка применяли 10 мелющих шаров диаметром 10 мм из стали ХВГ. Процесс легирования осуществлялся в течение 30 мин, при этом из-за больших скоростей вращения происходил разогрев капсул с композицией до $60-80$ °С. Далее проводилась термообработка в вакууме с целью удаления возможных органических примесей и восстановления медного порошка по режиму: $T=200$ °С (1 час), затем $T=350$ °С (1 час) и $T=500$ °С (4 часа). Ступенчатый нагрев садки обеспечивает поэтапное удаление влаги, органических загрязнений и исключает падение вакуума при нагреве сразу на 500 °С. Отжиг композиции проводился в двух контейнерах (масса смеси в каждом контейнере составляет ~2000 г.)

Согласно принципам получения деталей методом порошковой металлургии, предварительное прессование до заданной плотности обеспечивает в дальнейшем меньшую деформацию капсул при газостатической обработке. Предварительное прессование осуществлялось в стальной капсуле усилием 100 тс, в результате была получена цилиндрическая заготовка диаметром 200 мм, высотой 26 мм, масса составила ~4000 г. Далее было проведено горячее изостатическое прессование (ГИП) в газостате QVINTUS-250 по режиму $T=950$ °С, давление аргона $P=1400$ МПа. Время выдержки на режиме – 5 час.

Механическая обработка с целью удаления капсулы выполнена на токарном станке. После обработки в газостате проведено определение плотности гидростатическим взвешиванием, в результате которого установлено, что образец представляет собой монолит плотностью $8,59$ г/см³ (что составляет 96% плотности меди М1). Визуально границы между двумя заготовками в монолите по высоте заготовки, а так же включений чёрного цвета не наблюдается.

Для проведения комплекса исследований диск был разделён на фрагменты (рис. 2). Часть образцов, предназначенных для механических испытаний подвергалась отжигу при $T = 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин.

Раскатка заготовки осуществлялась на вальцах с толщины 11 мм до $9,5 \div 9,8$. В процессе раскатки при достижении степени деформации $\sim 13\%$ заготовка разрушилась на три части.



Рис. 2. Фрагменты диска для проведения исследований

Для механических испытаний изготавливались цилиндрические образцы с толщиной рабочей части 5 мм по ГОСТ 1497-84 [5]. Результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Результаты прочностных испытаний показали, что предел текучести композита после ГИП на $\sim 11\%$ превышает аналогичный показатель образца ПМС-1 (без легирующих частиц) и в 2 раза превышает предел текучести меди марки М2, что свидетельствует о положительном влиянии внедрения наноразмерных частиц в медную матрицу.

Состояние образца	Т испытаний, $^{\circ}\text{C}$	В		, %	Ψ , %
		В	02		
		кгс/мм ²			
ГИП, без раскатки без отжига	20	17,6	10,2	10,8	7,8
		16,6	11,2	8,4	7,8
	600	1,5	1,0	8,8	
		2,0	1,0	8,0	
ГИП, без раскатки после отжига	20	16,7	8,8	12,4	9,8

Теплопроводность композита измерялась на образце после ГИП с помощью установки ЛКТ-2.

Высокая теплопроводность металлических композитов объясняется тем, что перенос тепла в них осуществляется в основном передачей энергии электронами, в отличие от неметаллических веществ, где энергия переносится в основном тепловыми колебаниями атомов. Теплопроводность исследуемого образца композита составила $289\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, что на $\sim 20\%$ превышает теплопроводность традиционно используемой бронзы БрХ08 ($239\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$).

В микроструктуре образца, вырезанного с края диска (без раскатки, рис. 3) присутствуют области чёрного цвета, предположительно, микропоры. Микроструктура материала образца, вырезанного из центра разрушенного диска после раскатки, представлена на рис. 4.

Следует отметить, что для металлов с гранцентрированной кубической решёткой характерным признаком пластической деформации являются деформационные полосы. В исследуемом образце после раскатки полосы отсутствуют.



Рис. 3. Микроструктура образца до раскатки, (травление реактивом Марбле, увеличение $\times 100$)



Рис. 4. Микроструктура образца после раскатки, (травление реактивом Марбле, увеличение $\times 100$)

Величина зерна преимущественно составляет 9 балл шкалы ГОСТ 21073.1-75 [6], ориентировочный диаметр ~ 0,012 мм, на некоторых участках присутствуют более крупные зёрна размером до 0,05 мм. Следует отметить, что теплопроводность композита зависит от величины зерна и резко падает с его ростом. В микроструктуре исследуемого образца границ гранул матричного материала, агломератов УНТ не наблюдается.

Анализ содержания углерода и серы производился на установке LECO CS-46. С каждого образца медного нанокompозита отбирается стружка массой ~20 грамм. При этом стружка сжигается в индукционной печи установки в атмосфере кислорода. Продукты сгорания CO, CO₂, SO₂ измеряются по отдельности специальными детекторами инфракрасного излучения. Выходные сигналы детекторов суммируются электронным способом, и выдаётся количественный результат анализа - процентное содержание серы и углерода. Согласно полученным данным, в исследуемых образцах концентрация углерода составляет 0,0475±0,0001%, серы – 0,002±0,0001%.

Полученные результаты показывают принципиальную возможность получения медного композиционного материала, упрочненного наноразмерными частицами углерода – УНТ методом механического легирования.

Основной характеристикой в прочностных расчетах по определению работоспособности конструкции является предел текучести конструкционного материала. В образцах композиции состава Cu + 0,5 масс. % УНТ в состоянии поставки после газостатического упрочнения получено повышение предела текучести на ~11% по сравнению с образцом ПМС-1 (без легирующих частиц) и на ~100% по сравнению с чистой медью.

С другой стороны, полученные результаты и проведенные исследования показали необходимость уточнения технологии получения медного нанокompозита. Прежде всего, необходимо решить вопрос восстановления медного порошка, так как восстановление в вакууме приводит к сращиванию гранул. Операцию восстановления необходимо производить в газообразной восстановительной среде (в водороде) для получения сыпучей фракции восстановленной меди.

Следует отметить, что в процессе механического смешивания в планетарных мельницах происходило внедрение частиц упрочняющей фазы – УНТ в медную матрицу.

Для внедрения частиц упрочняющей фазы в медную матрицу и разделения агломератов УНТ можно использовать другие технологические приемы, например, введение поверхностно активных веществ.

При выборе режимов горячего изостатического прессования использовали данные о сохранении жизнеспособности частиц УНТ, по которым до 700 °С на воздухе и до 3000 °С в вакууме. Результаты металлографических исследований показали, что проведение ГИП по режиму T=950 °С достаточно для консолидации композита.

ВЫВОДЫ

Описанная технология получения медного

композиционного материала, упрочненного углеродными наноразмерными материалами УНТ, методом механического легирования с последующим горячим изостатическим прессованием имеет предпосылки решения задачи разработки композита с механическими свойствами, в 2 и более раз превышающих уровень промышленного сплава БрХ08, и теплопроводностью на уровне чистой меди.

По уровню механических характеристик, на начальном этапе, полученный образец композита соответствует промышленной бронзе БрХ08.

По уровню теплопроводности ($\lambda = 289$ Вт/м К для сплава Cu + 0,5 масс.% УНТ) медный нанокompозит превышает аналогичный показатель для сплава БрХ08.

Литература

1. Chu, K. Fabrication and effective thermal conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites for heat sink applications [Text] / K. Chu, W. Qingying // Composites Science and Technology. – 2010. – vol. 70. – pp. 298–304.
2. Predicting the thermal conductivity of composite materials with imperfect interfaces [Text] / J. Marcos-Gómez, M.R. Ching-Lloyd, W.J. Elizalde, J.M. Clegg, Molina-Aldareguia // Composites Science and Technology. – 2010. – vol. 70. – pp. 2276–2283.
3. Ваганов, В.Е. Углеродсодержащие нанокompозиты на основе меди функционального и конструкционного назначения [Текст] / В.Е. Ваганов, В.Д.Захаров, В.В.Решетняк // Материаловедение. – 2013. - №3. – С. 25-32.
4. ГОСТ 4960-75. Порошок медный электролитический. Технические условия [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 12с.

5. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]. – Введ. 1984-07-16. – М.: Стандартинформ, 2008. – 24с.
6. ГОСТ 21073.1-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой

микроструктур [Текст]. – Введ. 1976-07-01. – М.: Издательство стандартов, 2008. – 24с.

Воронежский государственный технический университет

STRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER MATRIX NANOSTRUCTURED COMPOSITE MATERIAL OBTAINED BY MECHANICAL ALLOYING

Yu.R. Kopylov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: urkopulov@mail.ru

Yu.A. Schetin, graduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: yurii.kbxa@mail.ru

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

By the structural materials used in rocket for the manufacture of "hot machines" (combustion chambers, gas generators, heat exchangers), meet high requirements on the thermal conductivity, heat resistance and heat resistance. Currently, the specified requirements are met by heat-resistant bronze in combination with the thermal barrier coating, for example alloys Narloy Z, bronze or BrHTsrT BrH08 that provide heat flux to eat 36 106 kcal / m²chas. For developed new rocket engine needs a new structural material with high thermal conductivity while maintaining its mechanical properties. The most promising material is pure copper, with the introduction in its metal matrix carbon nanoparticles (nanotubes, fullerenes), which can significantly increase the heat resistance.

This article describes in detail the first technology of obtaining, structure and properties of the composite with a mass fraction of 0.5% CNTs obtained by mechanical alloying. For comparison, the properties of the sample of copper powder ICP-1 without the addition of carbon nanoparticles. For mechanical alloying using a planetary mill "pulverisette 5» (FRITSCH). doping process was carried out for 30 minutes while heating took place capsules with the composition to 60-80 ° C. Next, heat treatment was performed in a vacuum, and annealing the composition. Pre-compression was carried out in a steel capsule force of 100 ton, cylindrical preform was obtained as a result. It was further held hot isostatic pressing (HIP) in gazostat QVINTUS-250. For mechanical testing the samples were fabricated with cylindrical working portion 5 mm thick.

The results of strength tests have shown that the limit of the composite strength after HIP at ~ 11% higher than in sample ICP-1 (non-alloy particles) and 2 times higher than the yield strength of the M2 brand copper. The thermal conductivity of the composite sample of the test was 289 W / m • K, which is ~ 20% higher than the thermal conductivity of the traditionally used BrH08 bronze (239 W / m • K). These results demonstrate the fundamental possibility of producing a copper composite material reinforced with nano-sized particles of carbon - CNT by mechanical alloying, however, there is need to clarify the technology of its receipt

Key words: nanocomposite copper, mechanical properties, heat treatment

References

1. Chu K., Qingying W. Fabrication and effective thermal conductivity of multi-walled carbon nanotubes reinforced Cu matrix composites for heat sink applications. // *Composites Science and Technology*. – 2010. – vol. 70. – pp. 298–304.
2. Marcos-Gómez J., Ching-Lloyd M.R., Elizalde W.J., Clegg J.M., Molina-Aldareguia. Predicting the thermal conductivity of composite materials with imperfect interfaces. // *Composites Science and Technology*. – 2010. – vol. 70. – pp. 2276–2283.
3. Vaganov V.E., Zaharov A.D., Reshetnyak V.V. Uglerosoderzhashie nanocomposite na osnove medi funktsionalnogo i konstruktsionnogo naznasheniya [Containing carbon nanocomposites on the basis of copper of functional and constructional purpose] // *Materials science*. – 2013. - No. 3. –25-32 p.
4. GOST 4960-75. Poroshok mednyi elektroliticheskii. Texnicheskie usloviya [Electrolytic copper powder. Specifications]. 1977-01-01. – М.: Standards Publishing House, 1998. – 12 p.
5. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na ractyazhenie [Metals. Test methods Tensile]. – 1984-07-16. – М.: Standartinform, 2008. – 24 p.
6. GOST 21073.1-75 Metally tsetnye. Opredelenie velichiny zerna metodom cravneniya co shkaloy mikrostruktur [Non-ferrous metals. Determination of the grain size by comparison with the scale microstructures]. – 1976-07-01. – М.: Standards Publishing House, 2008. – 24 p.

СТРУКТУРА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК $(\text{SnO}_2)_x \cdot (\text{ZnO})_{1-x}$ ДЛЯ $x = 0,3; 0,5$

С.А. Белоусов, Н.Н. Кошелева, А.А. Носов, Т.Г. Меньшикова, С.И. Рембеза

Металлооксидные пленки состава $(\text{SnO}_2)_x \cdot (\text{ZnO})_{1-x}$ для $x = 0,3; 0,5$, что соответствует соотношениям ZnO и SnO_2 2:1 ($x = 0,3$) ZTO2 и 1:1 ($x = 0,5$) ZTO1, изготовлены методом ионно-лучевого распыления в атмосфере Ar. Исследованы элементный и фазовый состав, структура пленок, их электрические и оптические свойства в аморфном состоянии. Свойства аморфных пленок ZTO1 и ZTO2 позволяют использовать их в прозрачной электронике в качестве канала (ZTO1) или в качестве прозрачных электропроводящих истока, стока и контакта затвора (ZTO2). После термообработки при 580°C в течение шести часов пленка ZTO1 не кристаллизовалась, а пленка ZTO2 представляет собой кристаллическую фазу Zn_2SnO_4 . Оценена возможность использования пленок ZTO1 и ZTO2 в прозрачной электронике и газовой сенсорике

Ключевые слова: тонкие пленки, ионно-лучевое распыление, элементный и фазовый состав, электрические и оптические свойства

Введение

Около 20 лет назад сформировалось новое направление в электронике – прозрачная электроника. Основными материалами прозрачной электроники стали широкозонные ($\Delta E_g = 3$ эВ) металлооксидные полупроводники [1], например SnO_2 , ZnO , TiO_2 и другие. Тонкие пленки металлооксидных полупроводников много лет находили применение при изготовлении солнечных элементов [2], датчиков газов [3], полевых транзисторов [4] и в других областях науки и техники, а в настоящее время используются для изготовления приборов и изделий прозрачной электроники.

При одновременном синтезе металлооксидов SnO_2 и ZnO могут образовываться новые фазы ZnSnO_3 и Zn_2SnO_4 [5], которые прозрачны в видимом диапазоне света, и также могут использоваться в прозрачной электронике. В данной работе приведены результаты исследований структуры и электрофизических свойств пленок, образующихся при одновременном синтезе SnO_2 и ZnO в различных пропорциях и оценка возможности их использования в прозрачной электронике.

Методика изготовления образцов

Металлооксидные пленки переменного состава ZnO и SnO_2 были синтезированы методом ионно-лучевого распыления в атмосфере Ar составной мишени, состоящей из керамических полосок ZnO и SnO_2 [6], размещенных на держателе с переменным

шагом. Элементный состав напыленных пленок (толщиной 3 мкм) анализировался с помощью микроанализатора JEOL JXA – 840 методом энергодисперсионного анализа вторичных электронов. Толщина пленок измерялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4.

Степень кристаллизации образцов и их фазовый состав контролировались методом рентгеновской дифракции на спектрометре Bruker 2D Phaser. Оптические свойства синтезированных пленок изучались с помощью двухлучевого спектрофотометра видимого диапазона СПЕКС СПП-715М.

Определялся спектр пропускания пленок, на основе которого рассчитывался коэффициент поглощения и определялась ширина запрещенной зоны металлооксидов.

Поверхностное сопротивление образцов измерялось четырехзондовым методом на установке ЦИУС-4. Концентрация и подвижность носителей зарядов измерялась с помощью эффекта Холла в переменном поле 0,63 Тл. Поверхность пленок сканировалась на атомно-силовом микроскопе FemtoScan-001. Термообработка образцов осуществлялась на воздухе в горизонтальной печи до температуры 580°C . Дальнейшее повышение температуры было не целесообразно, так как могло приводить к разрушению стекла подложки образцов.

Результаты и обсуждение

Из набора синтезированных образцов для исследований были выбраны №2 и №5 с содержанием цинка 27 ат % (№2) и 35 ат % (№5) и содержанием олова 15 ат % (2) и 10 ат % (№5). Количество Zn и Sn в образце №2 соответствовало количеству ZnO и SnO_2 в соотношении примерно 1:1 (51 ат % SnO_2 :45 ат % ZnO) (в дальнейшем этот образец будет обозначаться как ZTO1), а количество ZnO и SnO_2 в образце №5 соответствовало соотношению ZnO и SnO_2 примерно как ~ 2:1 (70 ат % SnO_2 :30 ат % ZnO) (образец ZTO2). Рентгеновский дифракционный анализ показал, что оба образца сразу после напы-

Белоусов Сергей Алексеевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: heroy777@mail.ru

Кошелева Наталья Николаевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vstu-prp@yandex.ru

Носов Андрей Андреевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: sir.baters@yandex.ru

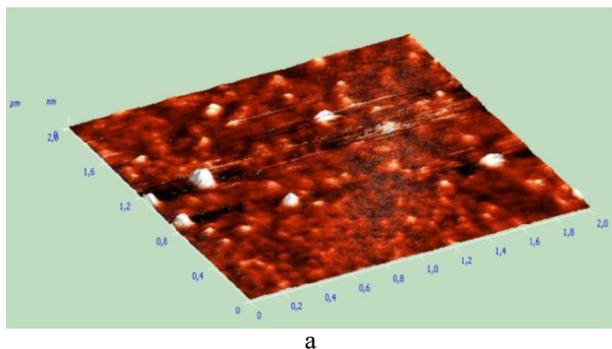
Меньшикова Татьяна Геннадьевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: menshikova.vrn@mail.ru

Рембеза Станислав Иванович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: rembeza@yandex.ru

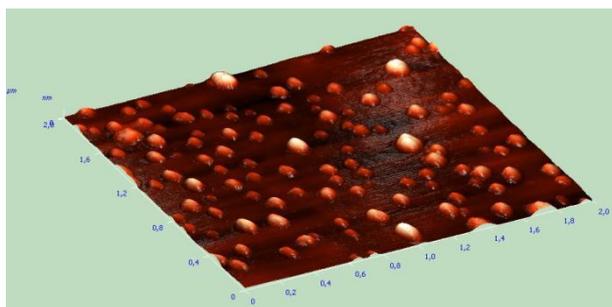
ления имели аморфную структуру. Толщина пленок на стеклянных подложках составляла ~ 3 мкм.

Концентрация электронов в свежеприготовленных пленках составила $n = 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (ZTO1) и $n = 9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (ZTO2), а подвижность свободных носителей зарядов $\mu = 7 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $\mu = 18 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, соответственно. Таким образом, аморфные пленки характеризуются сравнительно высокими значениями концентрации и подвижности электронов. Электрофизические свойства пленок ZTO1 позволяют использовать их в качестве канала прозрачного полевого транзистора. Пленки ZTO2 могут использоваться как прозрачные токопроводящие покрытия. Свежеприготовленные пленки имеют светлорыжий цвет, что указывает на слабое пропускание сине-фиолетовой части оптического спектра.

Аморфные пленки обычно имеют небольшую шероховатость, что подтверждает рис. 1а, на котором приведен рельеф пленки ZTO2. Шероховатость пленок не превышает 5 нм. После отжига пленки ZTO2 при 580°C в течение 6 часов рельеф поверхности изменился (рис 1б), увеличилась шероховатость до 12 нм и плотность дефектов.



а

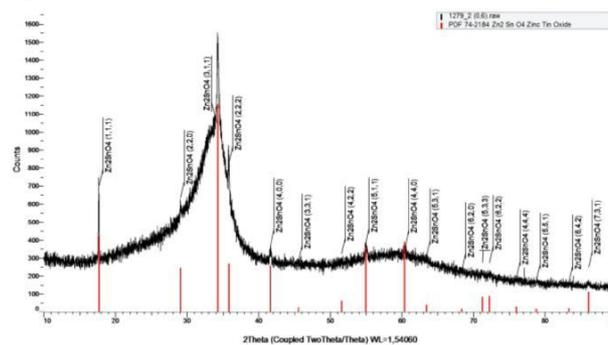


б

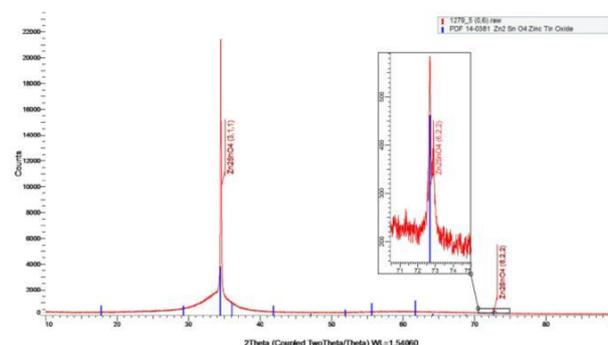
Рис. 1. Рельеф пленки ZTO2: (а) до отжига; (б) после отжига 6 ч. 580°C

Для кристаллизации пленок их отжили при температуре 580°C в течение 6 часов. Температура отжига выбрана с учетом температуры кристаллизации оксида цинка (575°C) [5] и ограничений из-за размягчения стеклянных подложек. Рентгеновские спектры образцов ZTO1 и ZTO2 приведены на рис. 2 и показывают, что пленка ZTO1 полностью не кристаллизовалась, а пленка ZTO2 содержит кристаллическую фазу Zn_2SnO_4 . Таким образом, для получения преобладающей фазы Zn_2SnO_4 необходимо

выбирать соотношение компонентов ZnO и SnO_2 как 2:1.



а



б

Рис. 2. XRD анализ тонких пленок $(\text{SnO}_2)_x(\text{ZnO})_{1-x}$ после отжига при $T = 580^\circ\text{C}$ в течение 6 часов. (а) образец ZTO1 с соотношением ZnO и SnO_2 как 1:1; (б) образец № 5 с соотношением ZnO и SnO_2 как 2:1

После отжига образцы ZTO1 и ZTO2 посветлели и стали более прозрачными. На рис. 3 спектры пропускания образца ZTO2, похожие спектры наблюдались и для образца ZTO2.

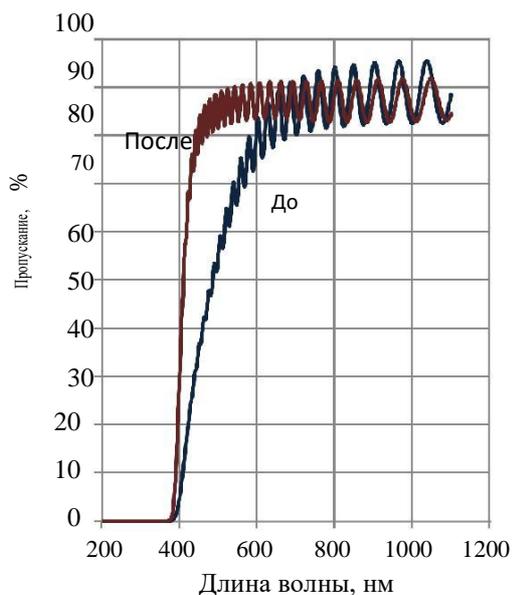


Рис. 3. Спектры пропускания образца ZTO2: до отжига и после отжига (6 ч. 580°C)

Из спектрального расположения интерференционных максимумов в спектре пропускания можно вычислить величину коэффициента преломления пленок в видимом диапазоне [7]. Соответствующие значения n после термообработки составили 1,88 (ZTO1) и 2,53 (ZTO2). Знание величины коэффициента преломления пленок имеет важное значение для оценки возможности их использования в качестве просветляющих покрытий. Перестроение спектров пропускания в спектры поглощения для прямых оптических переходов приведено на рис. 4 и позволяет вычислить ширину запрещенной зоны для пленки ZTO1 (3,4 эВ) и для пленки ZTO2 (3,2 эВ). Меньшие экспериментальные значения ширины запрещенной зоны по сравнению с монокристаллом (3,7 эВ) могут быть следствием нестехиометричности состава образцов за счет избытка вакансий кислорода.

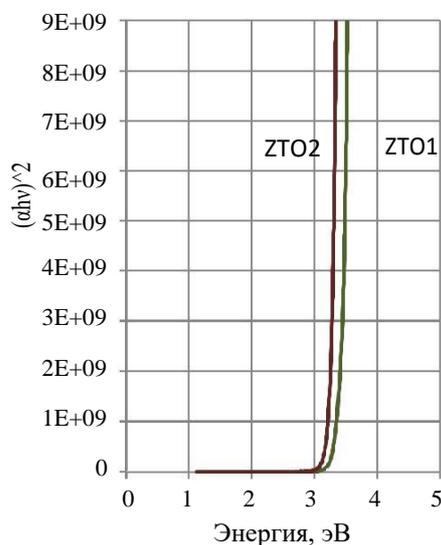


Рис. 4. Спектры поглощения образцов ZTO1 и ZTO2 в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$

Слоевое и удельное сопротивление пленок после термообработки сильно увеличилось и при комнатной температуре составило около 60 Ом·м для ZTO1 и ZTO2. Температурная зависимость слоевой проводимости характеризуется экспоненциальным ростом с увеличением температуры и двумя значениями энергии активации: (0,33 – 0,34) эВ от 220 до 310 °С и 0,6 эВ вблизи температуры 400 °С (рис. 5). Указанные значения энергии активации примесей могут быть обусловлены температурной ионизацией спектра ловушек, расположенных в интервале (0 – 0,5) эВ от дна зоны проводимости соединения Zn_2SnO_4 [8].

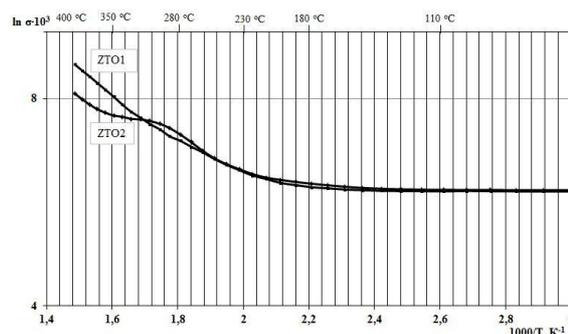


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления образцов ZTO1 и ZTO2 в координатах $\ln R = f(1000/T)$

Из рис. 5 следует, что на температурной зависимости $\sigma = f(1000/T)$ образца ZTO2 в области от 250 до 350 °С наблюдается характерный излом, существующий в газосенсорных металлооксидных пленках и обусловленный перезарядкой адсорбированных из воздуха ионов кислорода [9]. Обычно такие пленки обладают газовой чувствительностью в этой области температур. Действительно, пленка ZTO2 показала высокую газовую чувствительность к 3000 ppm спирта в воздухе на уровне 7 отн.ед. при температуре 340 °С. Пленка ZTO1 газовой чувствительностью не обладает.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что аморфные пленки с содержанием ZnO и SnO₂ в соотношениях 1:1 и 2:1 обладают удовлетворительной прозрачностью и высокой электропроводностью;
 2. Аморфные пленки ZTO1 и ZTO2 по своим электрофизическим параметрам могут использоваться в качестве канала полевого транзистора (ZTO1), либо в качестве прозрачных электропроводящих слоев (ZTO2);
 3. Пленки с соотношением ZnO и SnO₂ как 2:1 в основном содержит фазу Zn_2SnO_4 и после термообработки при 580 °С в течение 6 часов обладают прозрачностью 90 % и удельным сопротивлением 60 Ом·м;
 4. Высокотемпературная электропроводность пленок обусловлена термической ионизацией ловушек в запрещенной зоне Zn_2SnO_4 . Кристаллизованные пленки ZTO2 обладают хорошей газовой чувствительностью к спирту.
- Работа выполнена при финансовой поддержке научно-исследовательской работы №3.574.2014/К в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Wager, J.F. Transparent electronics [Text] / J.F. Wager // Science. - 2003. - Vol. 300. - P. 1245-1246.
2. Jung, J. Solar Cell [Text] / J. Jung, D.L. Kim, S.N. Oh, H.J. Kim // Solar Energy Mater. - 2012. - Vol. 102. - P. 103-108.

3. Lampe, V. Thin film oxygen sensors made of reactively sputtered ZnO [Text] / V. Lampe, J. Mülle // Sens. and Actuators. - 1989. - Vol. 18. - P. 269-284.

4. Hoffman, K.L. ZnO based transparent thin film transistor [Text] / K.L. Hoffman, B.I. Norris, J.F. Wager // Appl. Phys. Lett.. - 2003. - Vol. 82. - P. 733-735.

5. Abdulaziz, A. Sh. Al – Shahrani, Preparation and characterisation of ceramic and thin film Zn₂SnO₄ [Text] / A. Abdulaziz, Sh. Al – Shahrani // E-Theses, Diorham Un. - 1993. - Vol. 32. - P. 467-471.

6. Рембеза, С.И. Синтез многокомпонентных металлооксидных пленок различного состава (SnO₂)_x(ZnO)_{1-x} (x=1-0.5) [Текст] / С.И. Рембеза, Н.Н. Кошелева, Е.С. Рембеза, Т.В. Свистова, Е.Ю. Плотникова, Е. Suvaci, E. Ozel, G. Tuncolu, C. Aciksari // Физика и техника полупроводников. - 2014. - Т. 48. - № 8. - С. 1147-1151.

7. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники [Текст] / С.И. Рембеза, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, Н.И. Каргин – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. - 432 с.

8. Govindappa, C.K. Electrochemical generation of cubic shaped nano Zn₂SnO₄ photocatalysts [Text] / C.K. Govindappa, V.T. Venkatarangiah, S.B. Abd Hamid // Nano-micro Letters. - 2013. - Vol. 5. - №2. - P. 101-110.

9. Румянцева, М.Н. Влияние микроструктуры полупроводниковых сенсорных материалов на хемосорбцию кислорода на их поверхности [Текст] / М.Н. Румянцева, Е.А. Макеева, А.М. Гаськов // Российский Химический Журнал (ЖРХО им. Д.И.Менделеева). - 2008. - Т. 52. - №2. - С. 122-129.

Воронежский государственный технический университет

STRUCTURE, ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES FILMS (SnO₂)_x · (ZnO)_{1-x} FOR x = 0,3; 0,5

S.A. Belousov, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: heroy777@mail.ru

N.N. Kosheleva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vstu-ppe@yandex.ru

A.A. Nosov, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sir.baters@yandex.ru

T.G. Menshikova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: menshikova.vrn@mail.ru

S.I. Rembeza, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: rembeza@yandex.ru

Metal oxide film composition (SnO₂)_x · (ZnO)_{1-x} for x = 0,3; 0,5, which corresponds to the ZnO and SnO₂ ratio of 2: 1 (x = 0,3) ZTO2 and 1:1 (x = 0,5) ZTO1, made by ion beam sputtering in Ar atmosphere. The elemental and phase composition, the structure of the films are studied, electrical and optical properties in the amorphous state are measured. The properties of amorphous films ZTO1 and ZTO2 allow to use them in transparent electronics as channel (ZTO1) or as a transparent conductive source, drain and gate contacts (ZTO2). After heat treatment at 580 ° C for 6 hours ZTO1 film is not crystallized, as the film is a ZTO2 have crystalline phase Zn₂SnO₄. The possibility of using films ZTO1 and ZTO2 in transparent electronics and gas sensorics discussed

Key words: thin films, ion-beam sputtering, elemental and phase composition, electric and optical properties

References

1. Wager, J.F. Transparent electronics [Text] / J.F. Wager // Science. - 2003. - Vol. 300. - P. 1245-1246.
2. Jung, J. Solar Cell [Text] / J. Jung, D.L. Kim, S.N. Oh, H.J. Kim // Solar Energy Mater. - 2012. - Vol. 102. - P. 103-108.
3. Lampe, V. Thin film oxygen sensors made of reactively sputtered ZnO [Text] / V. Lampe, J. Mülle // Sens. and Actuators. - 1989. - Vol. 18. - P. 269-284.
4. Hoffman, K.L. ZnO based transparent thin film transistor [Text] / K.L. Hoffman, B.I. Norris, J.F. Wager // Appl. Phys. Lett.. - 2003. - Vol. 82. - P. 733-735.
5. Abdulaziz, A. Sh. Al – Shahrani, Preparation and characterisation of ceramic and thin film Zn₂SnO₄ [Text] / A. Abdulaziz, Sh. Al – Shahrani // E-Theses, Diorham Un. - 1993. - Vol. 32. - P. 467-471.
6. Rembeza, S.I. Sintez mnogokomponentnyh metalloksidnyh plenok razlichnogo sostava (SnO₂)_x(ZnO)_{1-x} (x=1-0.5) [Synthesis of multi-component metal oxide films of various compositions (SnO₂)_x(ZnO)_{1-x} (x=1-0.5)] / S.I. Rembeza, N.N. Kosheleva, E.S. Rembeza, T.V. Svistova, E.Ju. Plotnikova, E. Suvaci, E. Ozel, G. Tuncolu, C. Aciksari // Fizika i tehnika poluprovodnikov. - 2014. - Т. 48. - № 8. - С. 1147-1151.
7. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники [Physical methods of materials research of solid-state electronics] / С.И. Рембеза, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, Н.И. Каргин – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. - 432 с.
8. Govindappa, C.K. Electrochemical generation of cubic shaped nano Zn₂SnO₄ photocatalysts [Text] / C.K. Govindappa, V.T. Venkatarangiah, S.B. Abd Hamid // Nano-micro Letters. - 2013. - Vol. 5. - №2. - P. 101-110.
9. Rumjanceva, M.N. Vlijanie mikrostruktury poluprovodnikovyh sensornyh materialov na hemosorbiciju kisloroda na ih poverhnosti [Influence of microstructure on the semiconductor sensor materials oxygen chemisorption on the surface] / M.N. Rumjanceva, E.A. Makeeva, A.M. Gas'kov // Rossijskij Himicheskij Zhurnal (ZhRHO im. D.I.Mendeleeva). - 2008. - Т. 52. - №2. - С. 122-129.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Гаганов, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Я.В. Дарнева

Приведены результаты математического моделирования технологического процесса производства авиационных изделий из полимерных композиционных материалов. Представлены результаты многофакторного исследования технологического процесса автоматизированной выкладки экспериментальных образцов полимерного композиционного материала с заданными эксплуатационными характеристиками при помощи специализированных компьютерных средств для параметрических исследований и нелинейной оптимизации. Определен комплекс управляющих параметров, оказывающих наибольшее воздействие на результаты исследуемого технологического процесса в части механических свойств получаемых образцов. Созданы адаптивные нейросетевые модели, обеспечивающие прогнозирование результатов технологического процесса автоматизированной выкладки, позволяющие проводить оценку влияния управляющих параметров на прочностные характеристики образцов. Внедрение в производственный процесс разработанных методик многофакторного анализа позволит получить материал с заданными эксплуатационными характеристиками и снизить финансовые и временные затраты при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов

Ключевые слова: технологический процесс, моделирование, оптимизация

Введение

В настоящей статье представлены результаты многофакторного исследования и математического моделирования технологического процесса (ТП) автоматизированной выкладки экспериментальных образцов полимерного композиционного материала для автоматизированной выкладки (ПКМВ) с заданными эксплуатационными характеристиками при помощи специализированных компьютерных средств для параметрических исследований и нелинейной оптимизации.

В ходе работы проведен математический анализ, создана методика и программно-алгоритмические средства, позволяющие оценивать воздействие внешних параметров на результаты исследуемых ТП с помощью системы инженерного анализа STATISTICA.[3]

Постановка задачи

В качестве исходных данных были приняты типы и параметры материалов, рабочие характеристик процессов, реализованные в структуре рассматриваемых ТП на базе ПАО «ВАСО».

Графическая интерпретация результатов механических испытаний образцов, полученных при различных технологических режимах с учетом плана эксперимента представлена на рис. 1.

При планировании эксперимента задавались следующие диапазоны изменения управляющих параметров: температура формования (T_F) 160 - 180°C; время формования (B_F) 120 - 210 мин; давление формования (P_F) 2 - 7 кгс/см²; давление ролика (P_R) 7,23 - 13,25 кгс/см².

В качестве контролируемых использовались следующие параметры: температура окружающей среды, влажность воздуха, температура нагрева оснастки, натяжение препрега [1].

По итогам механических испытаний определялись значения прочностных характеристик образцов:

предел прочности (при комнатной температуре), МПа (*Sig1*);

модуль упругости (при комнатной температуре), ГПа (*Sig2*);

предел прочности при сжатии (при комнатной температуре), МПа (*Sig3*);

предел прочности (сдвиг в плоскости листа), МПа (*Sig4*);

модуль упругости (сдвиг в плоскости листа), ГПа (*Sig5*);

предел прочности (межслоевой сдвиг), МПа (*Sig6*);

предел прочности при отрыве от сот, МПа (*Sig7*).

Многомерный статистический анализ

Для построения адекватной регрессионной модели использован модуль Multiple Regression системы STATISTICA; [3] комплексный анализ проведен согласно следующей процедуре.

На первом этапе выполнялась оценка статистической значимости управляющих параметров для свойств образцов с использованием дисперсионного анализа на основе карты Парето. Затем, с использованием значимых параметров проводилось построение графиков поверхностей

Гаганов Александр Владимирович – НОЦ «ИТА» ВГТУ,

директор, тел. 8(473) 275 85 31, e-mail: avg036@mail.ru

Караева Оля Анатольевна – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, тел. 8 (909) 211 12 60, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru,

Кудрин Алексей Михайлович - НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел. 8(951) 556 92 51, e-mail: kudrin.ru@gmail.com

Дарнева Яна Валерьевна – ВГТУ, студент, тел. 8(903) 851 80 90, e-mail: dti73@mail.ru

отклика и контурных графиков с указанием линий уровня поверхности.

Контурные графики позволили также выполнить визуальный анализ влияния внешних условий на эксплуатационные характеристики получаемых образцов.

Далее рассматривалась многомерная зависимость механических свойств от всех управляющих параметров с применением полного

квадратичного полинома в качестве уравнения регрессии.

Типичные графики на примере параметра Sig4 приведены на рис. 2-4.

Далее, для детального описания всех возможных вариантов влияния проведен комплексный анализ зависимостей механических свойств от четырех управляющих параметров с использованием регрессии на основе квадратичного полинома.

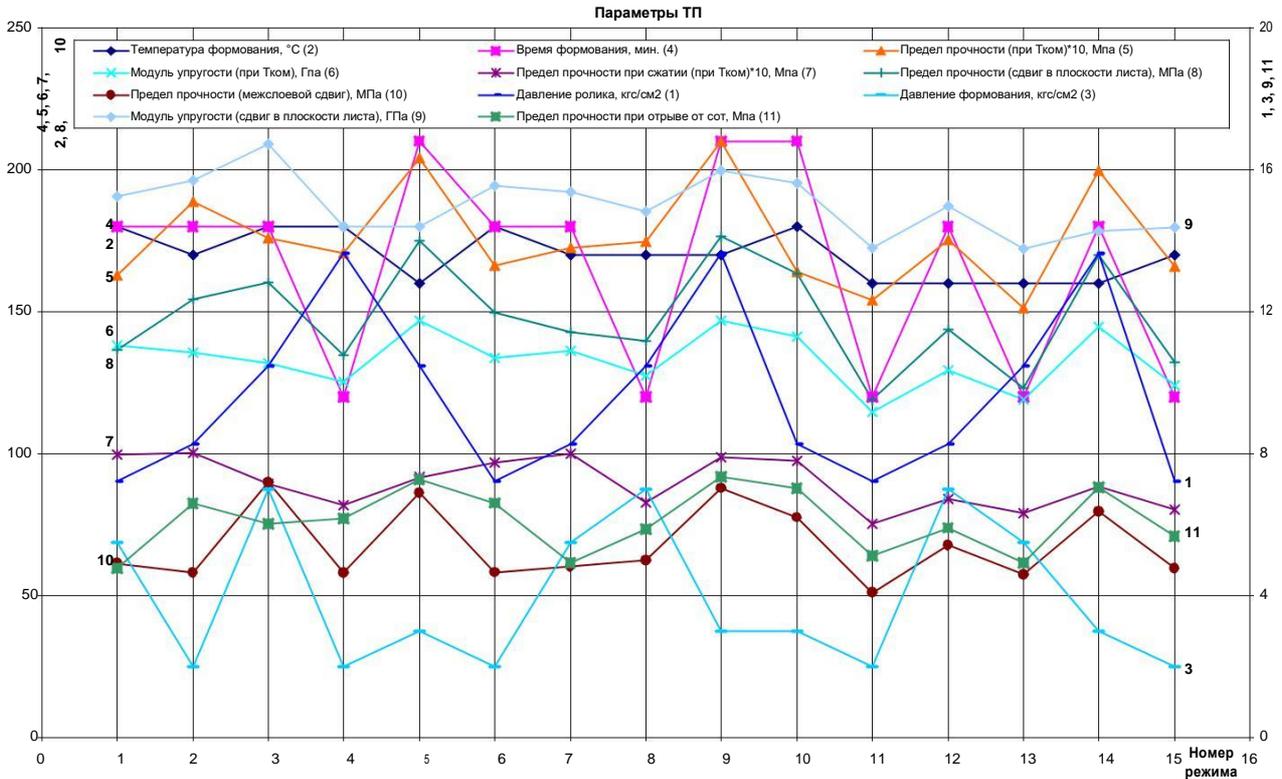


Рис. 1. Результаты выполнения ТП

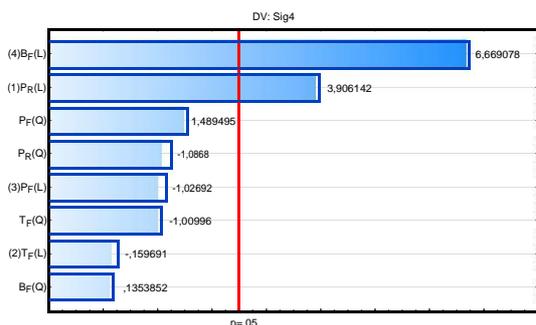


Рис. 2. Карта Парето для Sig4

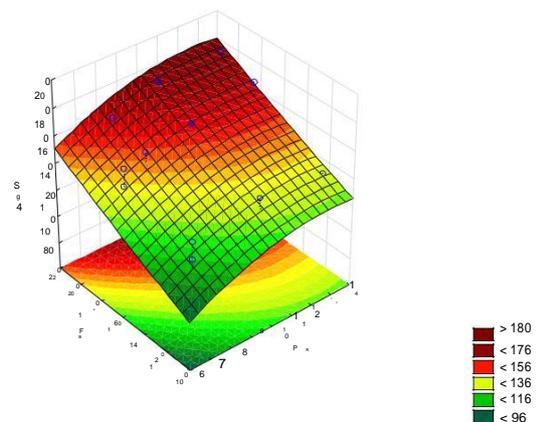


Рис. 3. График поверхности отклика для Sig4

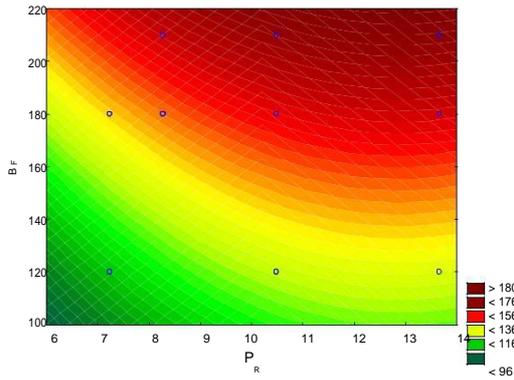


Рис. 4. Линии уровня поверхности для Sig4

В нижеследующей таблице приведены значения коэффициентов детерминации полученных многофакторных регрессионных моделей.

Свойство	Sig1	Sig2	Sig3	Sig4	Sig5	Sig6	Sig7
R ²	0,91813	0,91137	0,95891	0,93856	0,9164	0,82032	0,90734

По результатам множественной регрессии определены математические зависимости, позволяющие прогнозировать механические свойства материала:

$$\text{Sig1} = 1799,253 + 272,614 \cdot P_R - 2,363 \cdot P_R^2 - 125,585 \cdot T_F - 238,7 \cdot T_F^2 - 50,918 \cdot P_F + 231,252 \cdot P_F^2 + 318,346 \cdot B_F - 51,019 \cdot B_F^2. \quad (1)$$

$$\text{Sig2} = 138,6735 + 7,1175 \cdot P_R + 0,6053 \cdot P_R^2 + 1,2211 \cdot T_F - 6,6391 \cdot T_F^2 - 2,2998 \cdot P_F - 7,6827 \cdot P_F^2 + 19,8077 \cdot B_F - 2,4944 \cdot B_F^2. \quad (2)$$

$$\text{Sig3} = 1022,703 - 13,826 \cdot P_R - 47,060 \cdot P_R^2 + 77,638 \cdot T_F - 113,711 \cdot T_F^2 - 51,533 \cdot P_F - 141,222 \cdot P_F^2 + 115,143 \cdot B_F - 122,079 \cdot B_F^2. \quad (3)$$

$$\text{Sig4} = 149,5702 + 20,1122 \cdot P_R - 13,2258 \cdot P_R^2 - 0,7419 \cdot T_F - 7,6497 \cdot T_F^2 - 7,0363 \cdot P_F + 17,2118 \cdot P_F^2 + 41,4611 \cdot B_F + 1,4687 \cdot B_F^2. \quad (4)$$

$$\text{Sig5} = 15,12738 + 0,15102 \cdot P_R - 0,26154 \cdot P_R^2 + 1,02619 \cdot T_F - 0,90233 \cdot T_F^2 + 0,49476 \cdot P_F + 1,27932 \cdot P_F^2 + 1,3585 \cdot B_F - 0,40531 \cdot B_F^2. \quad (5)$$

$$\text{Sig6} = 59,82672 + 14,66732 \cdot P_R - 2,2442 \cdot P_R^2 - 0,64503 \cdot T_F + 3,84836 \cdot T_F^2 + 8,60901 \cdot P_F + 14,6466 \cdot P_F^2 + 28,42246 \cdot B_F + 16,56293 \cdot B_F^2. \quad (6)$$

$$\text{Sig7} = 5,396673 + 1,051649 \cdot P_R - 0,633931 \cdot P_R^2 - 0,111043 \cdot T_F - 0,035502 \cdot T_F^2 - 0,847166 \cdot P_F + 2,081991 \cdot P_F^2 + 1,844609 \cdot B_F + 0,744532 \cdot B_F^2. \quad (7)$$

Практически все зависимости имеют экстремумы в исследуемой области факторного пространства.

С использованием модуля DesignXplorer затем вычислялись коэффициенты чувствительности при средних значениях параметров.

В качестве уравнения регрессии проверялось уравнение полного квадратичного полинома для нелинейных моделей с помощью инструмента Goodness of Fit.

Показательные графики на примере параметра Sig4 приведены на рис. 5-6.

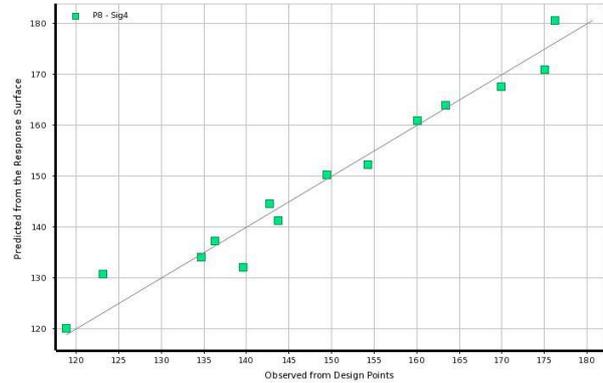


Рис. 5. Сравнение прогнозируемых значений и экспериментальных значений

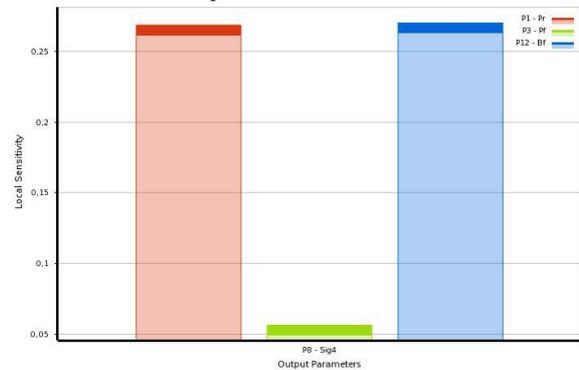


Рис. 6. Вычисленные коэффициенты чувствительности при средних значениях параметров

Далее проводилось прогнозирование механических свойств образцов на основе программной реализации нейронных сетей STATISTICA Neural Networks.

Входными параметрами, влияющими на механические свойства, определены: температура формования (T_F); время формования (B_F); давление формования (P_F); давление ролика (P_R) [2].

Выходными параметрами, характеризующими прочностные параметры, являются:

предел прочности (при комнатной температуре) – Sig1;

модуль упругости (при комнатной температуре) – Sig2;

предел прочности при сжатии (при комнатной температуре) – Sig3;

предел прочности (сдвиг в плоскости листа) – Sig4;

модуль упругости (сдвиг в плоскости листа) – Sig5;

предел прочности (межслоевой сдвиг) – Sig6;

предел прочности при отрыве от сот – Sig7.

Для моделирования зависимостей используется

многослойный перцептрон (МНС, рис. 7), скрытый слой которого содержит 16 нейронов [4].

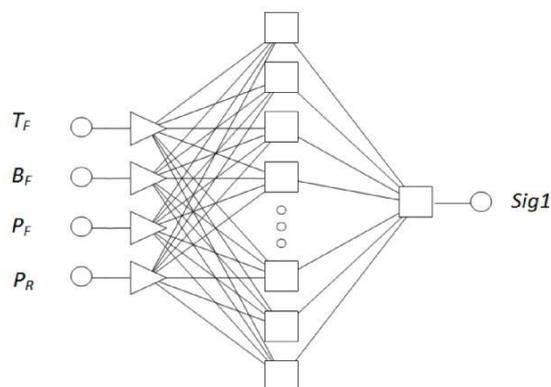


Рис. 7. Типовая нейросетевая модель ТП

Таким образом разработаны 7 МНС вида: $Sig1 = f_{NET}(T_F, B_F, P_F, P_R)$ и т.п. Обучающая и тестовая выборки формируются из результатов выполнения ТП.

Созданные нейросетевые модели функционируют согласно следующему алгоритму.

Выход сети рассчитывается по формуле:

$$n_{NET} \sum_{j=1}^{16} w_j \cdot x_j - b_0, \quad (8)$$

где \mathbf{x} – вектор входов, соответствующий определенному моменту времени (в нашем случае четырехмерный (T_F, B_F, P_F, P_R) ;

\mathbf{x} – функция активации;

w_j – вес соединения каждого выходного нейрона с j -ым нейроном скрытого слоя;

b_0 – порог выходного нейрона;

j – номер нейрона в скрытом слое.

В качестве функции активации используется логистическая сигмоида (функция Ферми):

$$j \cdot \mathbf{x} \frac{1}{1 + e^{-t_j \cdot \mathbf{x} \cdot b_j}}. \quad (9)$$

Здесь b_j – порог j -го нейрона скрытого слоя, а функция $t_j(\mathbf{x}, b_j)$ имеет вид:

$$t_j \cdot \mathbf{x} \cdot b_j \cdot v_{ij} \cdot x_i - b_j, \quad (10)$$

где v_{ij} – веса нейронов скрытого слоя.

На рис. 8 представлены результаты моделирования динамики механических свойств, полученные с использованием построенных нейросетевых моделей для параметра Sig4.

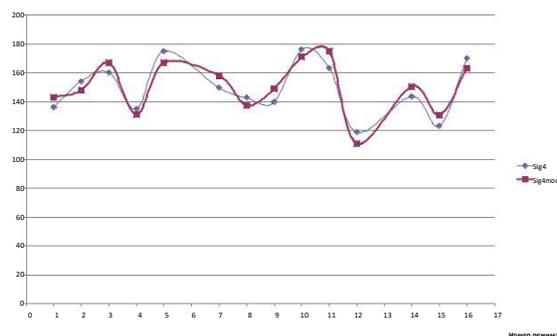


Рис. 8. Предел прочности (сдвиг в плоскости листа)

Для сопоставления на график нанесены исходные значения измерений (Sig4). В результате обучения МНС достигнута точность аппроксимации 0,1.

Созданные прогностические нейросетевые модели позволяют проводить оценку влияния управляющих параметров на прочностные характеристики образцов.

Выводы и заключение

В рамках выполненных работ определен

комплекс управляющих параметров, оказывающих наибольшее воздействие на результаты исследуемого ТП в части механических свойств получаемых образцов. Созданы адаптивные нейросетевые модели, обеспечивающие прогнозирование результатов ТП автоматизированной выкладки.

Результаты работ обеспечивают безусловное выполнение требований к механическим свойствам образцов. Внедрение в производственный процесс ВАСО разработанных методик многофакторного анализа позволяет получить материал с заданными эксплуатационными характеристиками и позволит снизить финансовые и временные затраты при изготовлении изделий из ПКМАВ.

Представленная работа выполнена в рамках прикладных научных исследований ФЦП «Исследование и разработка автоматизированного технологического процесса изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на примере створок мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А» (Соглашение № 14.574.21.0083).

Литература

1. Крыжановский В.К. Технология полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский. СПб.: Профессия, 2008.
2. Алентьев А.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов [Текст] / А.Ю. Алентьев, М.Ю. Яблокова. М.: МГУ, 2010. 69 с.
3. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов [Текст] . 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с: ил.
4. Нейросетевые системы управления [Текст] / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин, В.Н. Антонов. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1999. 265 с.

НОЦ «Инновационные технологии в авиастроении» Воронежского государственного технического университета НБЛ «Композиционные материалы» НОЦ «Инновационные технологии в авиастроении»
Воронежского государственного технического университета
Воронежский государственный технический университет

MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF AUTOMATED CALCULATIONS OF EXPERIMENTAL SAMPLES POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A.V. Gaganov, Director of the scientific-educational center "Innovative technologies in aircraft engineering", Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: avg036@mail.ru **O.V. Karaeva**, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Junior researcher of scientific and implementation laboratory «Composite material», Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru

A.M. Kudrin, Candidate of Physico-Mathematical Sciences Managing scientific and implementation laboratory «Composite material» Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kudrin.ru@gmail.com

Ya.V. Darneva, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dti73@mail.ru

Results of technological process mathematical simulation of aviation products production of polymeric composite materials are given. Results of technological process multiple-factor research of the automated calculation of polymeric composite material experimental samples with the set operational characteristics by means of specialized computer means for parametrical researches and nonlinear optimization are presented. The complex of the operating parameters making the greatest impact on results of the studied technological process regarding mechanical properties of the received samples is determined. The adaptive neural network models providing forecasting of technological process results of the automated calculation, allowing carrying out an assessment of the operating parameters influence on strength characteristics of samples are created. Introduction in production of the developed techniques of the multiple-factor analysis will allow receiving material with the set operational characteristics and to lower financial and time expenditure at production of products from polymeric composite materials

Key words: technological processes, modeling, optimization

References

1. Kryzhanovsky V. K. Tekhnologiya polimernykh materialov [Technology of polymeric materials]. Sankt-Petersburg: Profession, 2008
2. Alent'yev A.Yu. Svyazuyushchie dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Binding for polymeric composite materials]. Moscow, MGU, 2010. 69 p.
3. Borovikov V. STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere: Dlya professionalov. [Art of the analysis of data on the computer: For professionals.] Second edition, Sankt-Petersburg, 2003. 688.
4. Terekhov V.A., Efimov D.V., Tyukin I.Yu., Antonov V.N. Neyrosetevye sistemy upravleniya [Neural network control systems]. Sankt-Petersburg: Publishing house of the St. Petersburg university, 1999. 265